

Радиоэлектроника под водой

Ан. СЕРГЕЕВ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ПОД ВОДОЙ



„ЭНЕРГИЯ“
Ленинградское отделение
1971



УДК 534.88

Ан. Сергеев

С32 Радиоэлектроника под водой. Л., «Энергия», 1971.

144 с. с илл.

Брошюра знакомит читателя с одной из важных областей современной радиоэлектронной техники — гидроакустикой, основанной на использовании явления распространения акустических колебаний в водной среде. В книге рассматриваются основные особенности распространения звуковых волн в океанах и морях, принцип действия и устройство акустических антенн и других элементов гидроакустической аппаратуры.

Читатель узнает о принципах действия и работе важнейших гидроакустических средств, широко применяемых при решении различных задач, связанных с деятельностью человека в морских глубинах: гидролокаторов, шумопеленгаторов, приборов связи, рыбопоисковых приборов, навигационной аппаратуры.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: радиолюбителей и всех интересующихся современным состоянием различных видов радиоэлектронной техники.

3-4-1
303-70 **6Ф2**

ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустика — область науки, изучающая распространение звуковых колебаний в естественных водоемах (океанах и морях). Гидроакустикой называется также отрасль техники, связанная с созданием и использованием различных типов аппаратуры, принцип действия которой основан на использовании акустических волн, распространяющихся в воде.

Применение для сигнализации в воде именно акустических колебаний вызвано тем, что не существует каких-либо видов энергии, которые могли бы распространяться в воде так же эффективно, как звук. Даже в чистой морской воде видимость не превышает десятков метров, а в мутных прибрежных водах она составляет единицы и даже доли метров. Радиоволны, способные преодолевать безграничные дали космоса, едва распространяются в воде на несколько десятков метров.

На несколько сотен метров могут проникнуть в воду лучи лазера, работающие в сине-зеленой части спектра. Звук же может распространяться в воде на десятки, при благоприятных условиях на сотни, а иногда и на тысячи километров.

Гидроакустика как отрасль науки и техники возникла сравнительно недавно: немного менее ста лет тому назад. Однако ее возникновению предшествовало многовековое развитие акустики — одного из древнейших разделов физики. О хорошем распространении звука в воде знали еще древние ученые, о возможности использования звуков, создаваемых движущимися судами, говорил Леонардо да Винчи; идею создания простейшего прибора подводного наблюдения—шумопеленгатора — выдвинул выдающийся русский ученый и флотоводец С. О. Макаров. Крупнейшим поворотным пунктом в гидроакустике явилось открытие радио

нашим великим соотечественником А. С. Поповым. Развитие радиосвязи, изобретение электронной лампы и основанных на ее применении генераторов и усилителей способствовало появлению радиоэлектронных гидроакустических устройств. Начиная с двадцатых годов нашего столетия, гидроакустика развивалась и совершенствовалась как одна из прикладных областей применения радиоэлектроники, последовательно используя все новейшие достижения радиотехники, автоматики и других отраслей науки и техники. Вряд ли сегодня можно назвать какую-нибудь область радиоэлектронной техники, которая не нашла бы применения в современной гидроакустической аппаратуре. В то же время гидроакустика успешно развивается по своим специфическим направлениям. Все более глубоко изучаются вопросы, связанные с развитием теории распространения звука в море и с ее практическим применением, совершенствуются специфические гидроакустические антенны и т. д.

Чем же было вызвано появление гидроакустики и ее последующее успешное развитие? Гидроакустика, как и любая другая прикладная наука, возникла в связи с практическими потребностями человечества. Первые гидроакустические устройства, появившиеся в конце прошлого века, — подводные туманные колокола — позволяли обеспечить безопасность кораблевождения в условиях, когда нельзя видеть маячного огня. Трагическая гибель «Титаника» в 1912 г. вызвала появление идеи гидролокации, которая была выдвинута и реализована в 1916 г. русским инженером К. Шиловским совместно с выдающимся французским физиком П. Ланжевеном.

Совершенно исключительную роль в развитии гидроакустики оказали успехи подводного плавания. Подводная лодка и гидроакустика поистине неотделимы друг от друга. Именно гидроакустика позволяет подводной лодке, находясь на любой глубине, обнаруживать и атаковать противника, совершать беспримерные подледные плавания в арктических морях, совершать кругосветные переходы без всплытия на поверхность. Гидроакустика необходима и врагам подводной лодки — противолодочным кораблям. Борьба между подводными лодками и противолодоч-

ными силами долгие годы являлась основной областью применения гидроакустики.

Однако чисто военное применение гидроакустики далеко не исчерпывало ее возможности. Уже в двадцатых годах появились эхолоты — устройства, позволяющие определять глубину моря под килем корабля. Сегодня без эхолота не обходится ни одно судно — от лайнера и авианосца до туристского катера. Особенный интерес к гидроакустике проявился за последнее десятилетие, когда человечество стало стремиться к освоению «внутреннего космоса» — недоступных ранее глубин океанов и морей.

Перспективы, которые открывает перед человечеством возможность проникновения в тайны глубин океанов и морей и последующего использования этих глубин в практических интересах, поистине безграничны. Возможность планомерного использования огромных пищевых запасов, запасов различных полезных ископаемых, колонизации человеком морского дна и строительства целых подводных городов становится в наши дни реальностью. И какую бы задачу не решал человек под водой, он не может обойтись без гидроакустической техники. Наблюдение за окружающей средой, связь на глубине и с кораблями на поверхности, передача различных сигналов и команд на большие расстояния и многие другие задачи могут быть решены под водой только с помощью гидроакустики. Все больший интерес к этой науке начинают проявлять и радиолюбители, всегда активно реагирующие на все достижения технического прогресса.

Целью настоящей книги и является ознакомление широких кругов радиолюбителей и всех читателей, интересующихся новыми направлениями в развитии современной радиоэлектроники, с основами гидроакустики.

Все пожелания и замечания по книге просьба присылать по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

Несмотря на специфичность условий распространения звука в море, к гидроакустике применимы все основные положения классической физической акустики. Эти положения и рассматриваются в настоящей главе в самом общем виде и в объеме, обеспечивающем понимание последующего материала.

1. Звук. Акустические колебания и волны

Звук представляет собой механические колебания, распространяющиеся в упругой среде: твердой, жидкой или газообразной. Звуком также принято называть специфическое ощущение, вызываемое действием этих колебаний на наши органы слуха. Источником звука может являться любой физический процесс, вызывающий колебания частиц окружающей среды. Поскольку все частицы среды взаимосвязаны друг с другом, колебания одной из них неизбежно вызывают колебания соседних частиц, те, в свою очередь, передают колебания другим частицам. При этом частицы среды колеблются относительно некоторого своего среднего положения, передают колебания, но не движутся вместе с ними. Отклонение частиц от их среднего положения называется *величиной смещения*. Скорость, с которой происходит отклонение, называется *колебательной скоростью*. Процесс передачи колебательного движения в среде от одной частицы к другой называют *волновым процессом*.

Волновой процесс характеризуется определенными параметрами, например, *направлением распространения волны*. Поскольку колебательное движение передается от частицы к частице с некоторым запозданием, имеет место некоторая конечная скорость распростра-

нения колебаний в среде, называемая *скоростью распространения звука*. Не следует путать эту скорость с колебательной скоростью частиц среды. Распространение звуковых волн сопровождается сгущением и разрежением частиц среды. При сближении частиц в среде возникает избыточное давление, называемое акустическим или *звуковым давлением* p.

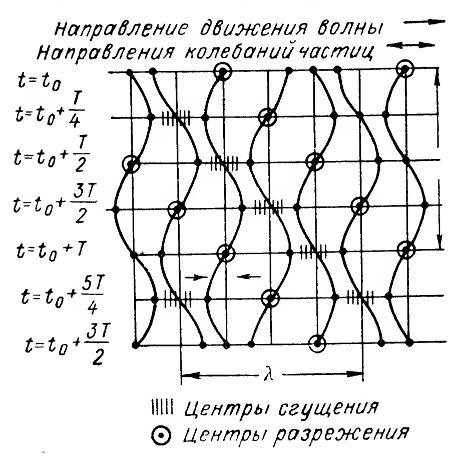


Рис. 1. Сгущения и разрежения при распространении колебаний в упругой среде, возникающие в последовательные моменты времени

Затем частицы устремляются в область разрежения, где, в свою очередь, создается сгущение. Весь этот процесс повторяется непрерывно и многократно, чем и обусловливается распространение колебаний в среде (рис. 1). Благодаря наличию сгущения и разряжения, колебания частиц сопровождаются изменениями давления в среде. Расстояние между двумя ближайшими точками колеблющейся среды, находящимися в одинаковом состоянии (фазе), называется *длиной волны* λ.

Максимальное смещение колеблющейся частицы называется *амплитудой колебания*. Время, за которое колебания в среде проходят путь, равный длине волны, называется *периодом колебания* T. За это время колеблющаяся частица среды совершает один

полный цикл отклонения от своего среднего положения. Число колебаний в единицу времени называют *частотой колебания* f.

Между скоростью звука c, длиной волны λ, частотой f и периодом T колебаний существует известная зависимость:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}.$$

Ухо человека способно воспринимать акустические колебания, лежащие в определенном диапазоне частот. Именно эти слышимые колебания и называют звуковыми. Весь диапазон акустических колебаний, охватывающий полосу от долей герца до нескольких мегагерц, обычно делят на поддиапазоны с условно принятыми границами: инфразвуковой, с частотой ниже 16 *гц*; звуковой, с частотой от 16 *гц* до 20 *кгц*; ультразвуковой, с частотой свыше 20 *кгц*; гиперзвуковой, с частотой свыше 100 *Мгц*. Все они находят то или иное техническое применение. В гидроакустике используют первые три поддиапазона.

Акустические волны вызывают колебания частиц среды вдоль направления их распространения, поэтому они называются *продольными*.

Геометрическое место точек среды, совершающих колебания с одинаковой фазой, образует *волновую поверхность*. Она перемещается в пространстве со скоростью распространения звука. Волновая поверхность, образующаяся в момент возникновения колебания, называется *фронтом волны*. Фронт волны перемещается со временем в пространстве. В зависимости от формы волновой поверхности различают плоские, цилиндрические и сферические акустические волны.

Если акустические волны образуются каким-либо точечным источником и распространяются в безграничном однородном пространстве равномерно во все стороны, волновой поверхностью является сфера, а волны называются *сферическими*. Если пространство, в котором распространяются акустические волны, ограничено параллельными плоскостями, перпендикулярными фронту волны, то волновая поверхность будет *цилиндрической*. Такой случай может иметь место, например, в мелком море, где грани-

цами водной среды являются поверхность и морское дно. При достаточно большом удалении цилиндрической или сферической волновой поверхности от точки излучения, когда радиус кривизны можно считать бесконечным, фронт волны становится плоским. Плоская волна может образовываться и в некоторых других случаях.

2. Громкость звука и его интенсивность

Для возбуждения акустических колебаний требуется совершить определенную работу, т. е. приложить силу и преодолеть сопротивление среды. Следовательно, возбуждение звука всегда сопровождается затратами энергии. Распространяющаяся в среде акустическая волна несет с собой особую колебательную энергию, называемую звуковой. Благодаря этому мы и слышим звук, создаваемый каким-то источником, находящимся на удалении от нас. Чем больше акустической энергии приходит к уху или какому-либо приемнику, тем громче слышится звук. Однако громкость звука является понятием субъективным и не поддается строгой количественной оценке.

Для оценки количества звуковой энергии, переносимой волной, в акустике используют понятие интенсивности звуковой волны или силы звука. *Сила звука* или его *интенсивность*, определяется количеством акустической энергии, протекающей за единицу времени через единицу проверхности, расположенной перпендикулярно к направлению движения волны. Так как поток энергии за единицу времени есть мощность, то интенсивность звука можно определить как мощность, передаваемую через единицу поверхности.

Интенсивность акустических волн I зависит от величины акустического давления p, создаваемого источником звука, которое, в свою очередь, зависит от акустических свойств среды и определяется величиной смещения частиц среды, вызываемого источником. Акустические свойства среды характеризуются ее акустическим сопротивлением w — величиной, равной произведению плотности среды ρ на скорость распространения звука c в ней, т. е.

$$w = \rho c.$$

Так, например, для воды акустическое сопротивление равно $1{,}5 \cdot 10^5$ *г/см² сек*; для воздуха — 43 *г/см² сек*, т. е. акустическое сопротивление воды примерно в 3500 раз больше акустического сопротивления воздуха. Говорят, что вода является средой, акустически более «жесткой», чем воздух. Физически акустическое сопротивление характеризует скорость колебания частиц среды под воздействием приложенного давления. Следовательно, при одинаковом приложенном давлении скорость колебания частиц воздуха будет в 3500 раз больше скорости колебания частиц воды.

Для плоской акустической волны имеет место зависимость:

$$I = \frac{1}{2} \frac{P_m^2}{\rho c},$$

где ρ — плотность среды; c — скорость распространения звука; P_m — амплитуда звукового давления.

Для плоской волны площадь волновой поверхности остается неизменной на любом удалении от источника. При цилиндрической волне волновая поверхность имеет форму цилиндра, и площадь ее возрастает по мере удаления R от центра (источника колебаний) пропорционально $2\pi R$. Соответственно для сферической волны по мере удаления от центра волновая поверхность будет увеличиваться пропорционально $4\pi R^2$.

Тогда, если интенсивность плоской волны в некоторой точке, удаленной на расстояние R от точки излучения, равна I_0, то для цилиндрической волны $I_{ц.\,в} = \frac{I_0}{2\pi R}$, а для сферической $I_{с.\,в} = \frac{I_0}{4\pi R^2}$. Уменьшение интенсивности из-за расширения фронта волны является одной из причин ослабления акустической энергии с расстоянием.

Понятие о децибелах. Человеческое ухо способно реагировать на звуки, сила которых изменяется в очень широких пределах. Так, самые громкие звуки (10^{-4} *вт/см²*), лежащие на пороге болевых ощущений, отличаются от самых слабых звуков (10^{-16} *вт/см²*), лежащих на пороге слышимости в 10^{12} раз. В гидроакустике минимальный ощутимый отраженный сигнал составляет около $0{,}65 \cdot 10^{-18}$ *вт/см²*, в то время

как на излучателе он может быть в 10^{18} раз больше.

Для удобства обращения с числами, лежащими в таком широком диапазоне, в акустике, как и в радиотехнике, используют логарифмический масштаб величин, выражая интенсивность и давление звука в децибелах (*дб*). Если интенсивность одного звука I_1, а другого I_2, причем $I_2 > I_1$, считают, что первый звук громче второго на N *дб,* где величина N определена из соотношения

$$N = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

Интенсивность звука пропорциональна квадрату акустического давления, поэтому отношение давлений P_1 и P_2 в децибелах определяется выражением

$$N = 20 \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

Некоторые отношения интенсивностей звука и звуковых давлений, выраженные в децибелах, приведены ниже:

дб	0,5	1	2	3	5	10	20	40	60	80	100	140
$\frac{I_2}{I_1}$	1,12	1,26	1,59	2	3,16	10	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}	10^{14}
$\frac{P_2}{P_1}$	1,06	1,12	1,26	1,41	1,78	3,16	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^7

Если, например, интенсивность одного звука в 100 раз больше интенсивности другого, то говорят, что первый звук громче второго на 20 *дб*. Диапазон слышимых сигналов равен 120 *дб*; сигналов гидролокатора — 180 *дб*. Удобство пользования шкалой децибел очевидно и после небольшой тренировки не вызывает никаких затруднений. При отсчете децибел необходимо указывать принятый нулевой уровень. В акустике за нулевой уровень обычно принимают так называемый порог слышимости, равный 10^{-16} *вт*/*см*^{2}; в гидроакустике — 1 *вт*/*см*^{2}.

3. Интерференция акустических волн

Если в упругой среде имеются два или несколько источников акустических волн, излучающих колебания одинаковой частоты с неизменяющейся во времени разностью фаз, возникает явление, называемое

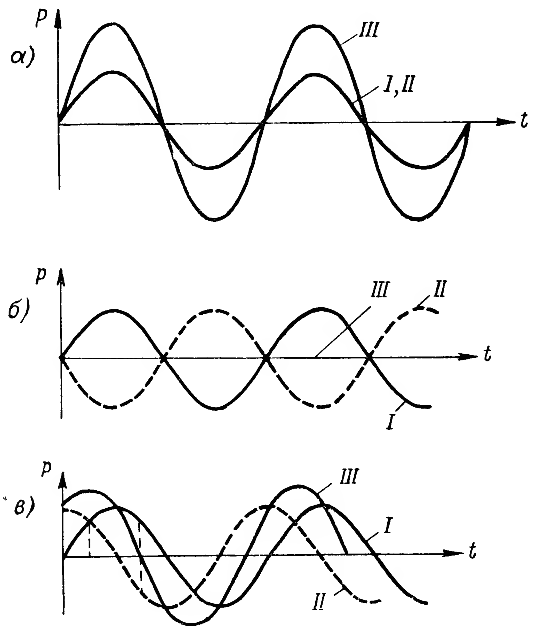


Рис. 2. Интерференция акустических волн: *а* — сдвиг фаз 0°; *б* — сдвиг фаз 180°; *в* — сдвиг фаз 90°

интерференцией (сложением), акустических волн. В результате интерференции в некоторой наблюдаемой точке среды происходит усиление или ослабление акустических колебаний. Если в эту точку придут два колебания одинаковой частоты, амплитуды и фазы, то амплитуда результирующего колебания возрастет в два раза (рис. 2, *а*). Если же придут два колебания одинаковой частоты, но противоположные по фазе, они взаимно уничтожат друг друга, и амплитуда результирующего колебания будет равна

нулю (рис. 2, *б*). И, наконец, в промежуточном случае, когда в наблюдаемую точку среды придут два колебания одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе на некоторую произвольную величину, отличную от 0° и 90°, амплитуда результирующего колебания будет меньше, чем в первом рассмотренном случае, но больше нуля (рис. 2, *в*).

Подчеркнем еще раз, что рассмотренные интерференционные явления имеют место для вполне определенных точек среды, в которой распространяются акустические колебания. Для других точек результат интерференции в общем случае будет иным. Это обстоятельство имеет в акустике исключительно важное практическое значение. Поясним это следующими рассуждениями.

Пусть имеются два совершенно одинаковых источника колебаний, излучающие синфазно сферические акустические волны одинаковой частоты и амплитуды. Расстояние между излучателями, обычно называемое базой, равно d. В результате совместного действия излучателей в окружающем пространстве будет происходить интерференция акустических волн. В точке a, расположенной на направлении, перпендикулярном к базе (это направление обычно называют осью базы), на таком удалении от излучателей, что можно считать лучи колебаний от каждого излучателя приходящими в нее параллельно, произойдет сложение колебаний в фазе, и амплитуда результирующего колебания будет равна удвоенной первоначальной амплитуде (рис. 3). В точку a', расположенную на таком же удалении, как и точка a, от излучателей, но под некоторым углом α к оси базы, колебания от каждого излучателя придут неодновременно. Будет иметь место так называемая разность хода лучей $\varepsilon = d \cdot \sin\alpha$, которая вызовет появление разности фаз колебаний, приходящих в эту точку.

$$\varphi = k\varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin\alpha,$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ обычно называют волновым числом. Из-за

этой разности фаз амплитуда результирующих колебаний будет меньшей, чем в точке *a*.

Если продолжать и дальше перемещать интересующую нас точку по дуге окружности так, чтобы угол α возрастал, будет увеличиваться разность хода лучей ε, а следовательно, и разность фаз φ. Амплитуда результирующих колебаний будет уменьшаться. В некоторой точке, где разность хода лучей будет равна $\lambda/2$, а сдвиг фаз $\varphi=180°$, амплитуда результирующих колебаний станет равной нулю. При дальнейшем увеличении угла α амплитуда результирующего колебания вновь начнет возрастать и при разности хода лучей, равной λ, достигнет максимального значения. Затем амплитуда результирующих колебаний вновь начнет уменьшаться и т. д. Таким образом можно видеть, что в результате интерференции колебаний от двух излучателей акустическая энергия в окружающем пространстве распределяется неравномерно. Это явление служит основой для создания излучающих и приемных акустических антенн направленного действия.

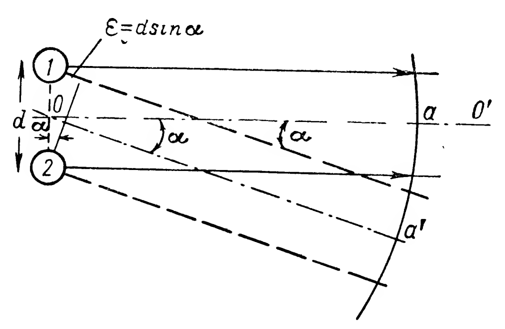


Рис. 3. Пояснение к явлению интерференции колебаний, создаваемых двумя излучателями

4. Отражение и преломление акустических волн

Если на пути распространения акустических волн встретится граница, разделяющая две различные среды, часть акустической энергии отразится от этой

границы, а другая часть перейдет во вторую среду. Причина отражения — различие акустических свойств каждой среды. Отражающая способность границы раздела двух сред, обладающих акустическими сопротивлениями w_1 и w_2 характеризуется коэффициентом отражения

$$k = \frac{1 - \frac{w_1}{w_2}}{1 + \frac{w_1}{w_2}},$$

где индекс «1» относится к среде, в которой распространяется акустическая волна, а индекс «2» — к среде, от границы которой происходит отражение. Коэффициент отражения показывает, во сколько раз акустическое давление отраженной волны будет меньше давления падающей волны. Часть энергии, не отразившаяся от границы раздела, проникает во вторую среду.

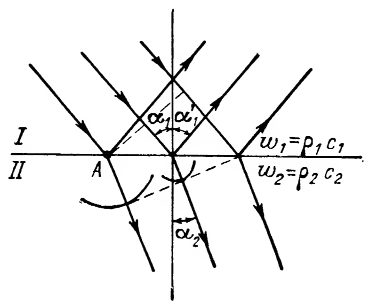


Рис. 4. Отражение и преломление плоской волны, падающей на границу раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями

Подставив полученные ранее значения акустических сопротивлений, можно убедиться, что при падении акустических волн, распространяющихся в воде, на границу раздела с воздухом, через эту границу проходит лишь 0,001 падающей энергии, вся остальная энергия отражается обратно в воду. От границы раздела сред, имеющих сравнительно небольшую разницу акустических сопротивлений, отражение будет менее существенным. Например, на границе раздела воды и песка морского дна $\left(\frac{w_1}{w_2} = 0{,}47\right)$ отразится лишь 13% падающей энергии. На границе раздела вода — сталь коэффициент отражения равен 0,93, т. е. близок к единице. Это обстоятельство делает возможным осуществление гидролокации таких целей, как подводные лодки.

При наклонном падении волны на границу раздела, волна, проникшая во вторую среду, меняет свое направление — испытывает преломление (рис. 4). Соотношения между направлениями падающей на границу раздела, отраженной от этой границы и проникшей во вторую среду (преломленной) волн аналогичны соответствующим соотношениям для световых волн: отраженный α'_1 и преломленный α_2 лучи лежат в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред в точке падения; угол отражения α'_1 равен углу падения α_1; угол преломления α_2 связан с углом падения α_1 зависимостью

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21} \text{ или } \frac{c_1}{\sin\alpha_1} = \frac{c_2}{\sin\alpha_2} = n_{21},$$

где c_1 и c_2 — скорости звука в соответствующих средах; n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой.

Представляет интерес особый случай, когда волна переходит из среды с меньшей скоростью распространения звука в среду с большей скоростью ($c_1 < c_2$), и угол падения равен или больше $\alpha_{кр}$, определяемого соотношением

$$\sin\alpha_{кр} = \frac{c_1}{c_2}.$$

При этом угол $\alpha_2 = 90°$ и преломленная акустическя волна отсутствует, преломленный луч скользит вдоль границы раздела, т. е. имеет место явление полного внутреннего отражения луча. Как отражение, так и преломление акустических волн имеют большое практическое значение в гидроакустике.

5. Дифракция и рассеяние акустических волн препятствиями

Если на пути распространения акустических волн оказывается препятствие, размеры которого сопоставимы или много меньше длины волны, возникает явление, называемое дифракцией. Сущность явления заключается в том, что акустические волны как бы огибают препятствие, и оно не оказывает влияния на дальнейшее распространение. Если размеры препят-

ствия оказываются больше длины акустической волны, явление дифракции становится менее заметным. За препятствием возникает нечетко выраженная зона акустической тени. Иногда такую зону называют зоной полутени. В пределах этой зоны звук оказывается значительно ослабленным. На значительном удалении от препятствия образовавшаяся в результате дифракции зона полутени может исчезнуть совсем и препятствие перестает влиять на дальнейшее распространение звука. В случае, когда размеры препятствия во много раз превосходят длину волны, зона акустической тени имеет четко очерченную границу. В этой зоне звук не прослушивается вовсе.

В результате встречи акустических волн с препятствием происходит также рассеяние волн. Препятствие, отражая акустическую энергию, как бы само становится излучателем акустических волн. Рассеянная препятствием энергия, возвратившаяся в точку излучения — приема, прослушивается в виде эха.

При рассеянии волн препятствиями только часть акустической энергии, упавшая на поверхность препятствия, отражается, в то время как волна продолжает свое движение в среде. Поэтому рассеяние может происходить многократно, от любого числа оказавшихся на пути волны препятствий и продолжаться до тех пор, пока вся энергия волны не окажется исчерпанной.

Рассеивающее акустическую энергию препятствие можно представить как бы состоящим из большого числа отдельных небольших (элементарных) излучателей, каждый из которых под воздействием падающей волны действует самостоятельно, создавая колебания со своей амплитудой и фазой. Если осуществлять прием рассеянных колебаний в какой-то точке, то суммарное колебание явится результатом интерференции колебаний, создаваемых этими «элементарными излучателями». Препятствия правильной формы могут создавать направленное рассеяние. Тела неправильной формы вызывают диффузное рассеяние, в некоторых случаях являющееся причиной бесполезных потерь акустической энергии и акустических помех.

Причиной рассеяния акустической энергии могут явиться не только сравнительно крупные препятствия, но и различные мелкие неоднородности среды. Например, при распространении акустических волн в воде рассеяние акустической энергии вызывает пузырьки газа, мелкие организмы животного и растительного происхождения (планктон), различные взвешенные частицы. Большое количество даже мельчайших рассеивающих звук частиц, может вызвать эффект, равносильный отражению от очень крупной сплошной поверхности.

Таковы некоторые основные положения физической акустики, которые необходимо помнить читателю для того, чтобы разобраться в особенностях распространения звука в океанах и морях.

ГЛАВА ВТОРАЯ

АКУСТИКА МОРЯ

Поскольку вода является упругой средой, для нее справедливы все основные законы физической акустики, рассмотренные в предыдущей главе. Однако вода океанов и морей обладает весьма важными специфическими особенностями, которые существенно влияют на характер распространения акустических волн. Важное значение имеют физические свойства морской воды. Морская вода содержит в растворе различные соли. Соленость воды неодинакова для различных морей и океанов, а в пределах одного моря может меняться в различных районах. Наличие солей влияет на упругие свойства воды, а следовательно, и на скорость распространения звука в ней, вызывая также потери акустической энергии при ее распространении.

Вода обладает малой теплопроводностью. Поэтому она сравнительно медленно нагревается или остывает, даже соседние слои воды в течение некоторого времени могут иметь неодинаковую температуру, что также влияет на скорость распространения звука в ней. Следовательно, слои с различной температурой будут иметь различные скорости звука и акустические сопротивления, т. е. будут акустически неоднородны.

Поскольку слой воды в океанах может достигать толщины нескольких километров, гидростатическое давление от поверхности ко дну будет возрастать. Каждым десяти метрам глубины будет соответствовать увеличение давления на 1 *ат*, что приводит к изменению плотности воды, а следовательно, и условий распространения звука. Поверхность моря является границей раздела вода — воздух, дно — границей раздела вода — грунт. Значительная разница в акустических свойствах этих граничных сред также весьма существенно сказывается на распространении звука. Кроме того, поверхность моря, граничащая с атмосферой и подвергающаяся воздействию солнечных лучей, обеспечивает теплообмен воды с атмосферой, что, как уже было сказано, приводит к изменениям в скорости распространения звука. Ветер вызывает волнение моря, которое также сказывается на распространении акустических волн. Наконец, море содержит огромное количество различных живых организмов, жизнедеятельность которых может в значительной степени влиять на распространение звука.

Эти и многие другие причины, о которых будет рассказано дальше, и определяют существенные различия в условиях распространения звука в идеальных средах и в воде океанов и морей. Посмотрим, в чем же эти различия проявляются.

6. Скорость звука в море

Скорость c распространения продольных волн в любой упругой среде, в том числе и в воде, выражается известной формулой физики

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль объемной упругости среды и ρ — ее плотность. Если сравнить значения величин, входящих в формулу, для воздуха и воды, можно увидеть, что морская вода является средой и более упругой, и более плотной. Объемные упругости: воздуха $1{,}43 \cdot 10^6$ *дин/см²*, воды — $2{,}32 \cdot 10^{10}$ *дин/см²*; плотности воздуха — 0,0013 *г/см³*, воды — 1 *г/см³*. Соответственно и

скорости звука, рассчитанные по формуле для этих значений, примерно равны для воздуха 330 *м/сек*, для воды — 1520 *м/сек*. Однако звук в реальных условиях будет распространяться со скоростью, значительно отличающейся от расчетной. Изменения температуры, солености и гидростатического давления в море вызывают изменения модуля объемной упругости и плотности воды, а это, в свою очередь, влияет на скорость распространения звука.

Влияние изменений температуры t, солености S воды и гидростатического давления p (как функции глубины h) на скорость звука c было определено опытным путем. Одна из полученных формул выражает эту зависимость следующим образом

$$c = 1450 + 4{,}21t - 0{,}037t^2 + 0{,}0175h + \\ + 1{,}14\,(S - 35),\ \text{м/сек}.$$

Как можно видеть из формулы, на скорость звука наиболее существенно влияет температура воды. Соленость мало изменяется для обширных районов морей и океанов. Изменение скорости звука из-за воздействия гидростатического давления линейно возрастает с глубиной. Следовательно, с известным приближением можно считать, что характер изменения скорости звука в данном районе моря на небольшой глубине схож с характером изменения температуры воды. Практически в любом районе моря скорость звука непрерывно меняется: сравнительно быстро в течение суток, медленно и плавно по мере смены времен года. Как будет показано дальше, изменения скорости звука со временем и с глубиной имеет исключительное практическое значение. Фактически в морях и океанах скорость звука может колебаться в очень широких пределах: от 1440 до 1540 *м/сек*.

Итак, мы видим, что скорость звука в воде примерно в 4,5 раза больше скорости звука в воздухе. Но она в 200 000 раз меньше скорости распространения электромагнитных волн. Тот путь, который электромагнитная волна пройдет за 1 *сек*., звук в воде пройдет более чем за 55 *ч*! Напоминая об этом читателям, предостерегаем от возможных ошибок при переводе частот в длину волны.

7. Рефракция акустических лучей

Как уже было показано, большое влияние на скорость звука в море оказывают изменения температуры воды. На температуру приповерхностного слоя воды влияют многие факторы: солнечная радиация, теплообмен между морем и атмосферой, испарение, таяние льдов и льдообразование, течения и конвекционные токи воды. Так как теплопроводность воды невелика, изменения температуры приповерхностных слоев воды сравнительно медленно передаются на глубину. Может образоваться значительная разница в температурах для различных глубин. Неравномерность распределения температуры и давления неизбежно приводят к неравномерности распределения скорости звука с глубиной. Таким образом, с точки зрения распространения акустических волн, море представляет собой среду, как бы состоящую из многих слоев, каждый из которых имеет свою скорость распространения звука. Так как скорость звука с глубиной изменяется плавно, море можно представить состоящим из бесчисленного множества слоев, имеющих бесконечно малую толщину.

Мы уже знаем, что акустические волны, проходя через границу раздела двух сред с различными акустическими свойствами, преломляются. Это преломление тем больше, чем больше разница в скоростях распространения звука в соседних слоях. При очень малых слоях и незначительной разнице скоростей звука в них (а именно такое допущение мы и сделали) преломление луча каждым слоем будет незначительным, и при прохождении большого числа слоев он опишет плавную кривую, форма и кривизна которой зависят от характера изменения скорости звука от слоя к слою (рис. 5).

Изменение траектории акустических лучей, вызванное неравномерностью распределения скорости звука с глубиной, называется *рефракцией*. Направление отклонения луча при переходе из слоя в слой определяется по приведенной ранее формуле

$$\frac{c_1}{\sin \alpha_1} = \frac{c_2}{\sin \alpha_2}.$$

Поэтому, если скорость звука в первом слое c_1 больше скорости во втором слое c_2, луч, приходящий на границу раздела слоев под углом α_1, пойдет во втором слое под углом α_2, причем $\alpha_1 > \alpha_2$. Следовательно, из-за рефракции акустические лучи всегда отклоняются в сторону, где скорость звука меньше, или, что то же самое, в сторону более холодных слоев воды. Рефракция акустических лучей в значительной степени определяет характер распространения акустических волн в океанах и морях, способст-

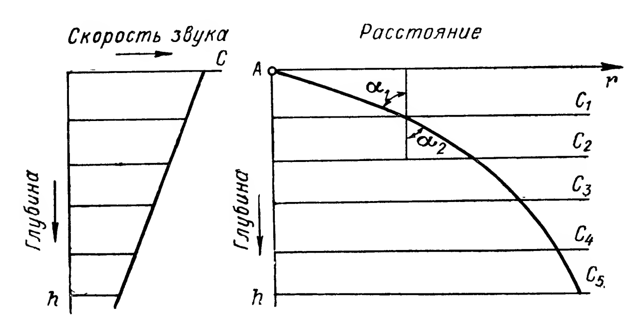


Рис. 5. Рефракция звукового луча в слоисто-неоднородной среде

вуя повышению или снижению эффективности гидроакустической аппаратуры.

Типичные случаи рефракции. Итак, мы установили, что по ряду причин скорость распространения звука оказывается в океанах и морях неодинаковой на различных глубинах. Однако как бы не были разнообразны и неповторимы процессы, определяющие распределение скорости звука с глубиной. это распределение может быть сведено к некоторым типовым случаям. В свою очередь, это позволяет говорить о типовых рефракционных картинах. Степень типизации при этом может быть самой различной. Мы можем ограничиться минимальным числом наиболее характерных типов.

Первый случай — скорость звука остается неизменной по всей глубине. Это может иметь место в осенние и зимние месяцы года в мелководных районах. Происходит циркуляция воды, и более холод-

ная вода из охлаждающихся атмосферой приповерхностных слоев равномерно перемешивается с более теплой водой глубинных слоев, прогревшихся за лето. При этом рефракции акустических лучей практически не происходит, они распространяются прямолинейно. Такой случай является идеализированным и на практике встречается очень редко. Более часто постоянство скорости звука сохраняется лишь в пределах определенной глубины. Это явление возможно в случаях, когда массы воды в приповерхностном слое перемешаны ветром или волной, и температура воды в нем выравнивается. Толщина слоя может до-

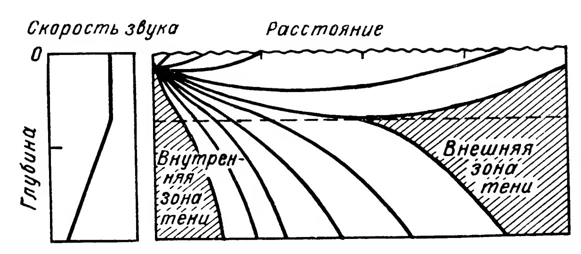


Рис. 6. Рефракция акустических лучей в случае постоянства скорости звука в приповерхностном слое

стигать десятков метров. Ниже этого слоя температура воды с глубиной падает. Акустические лучи, вышедшие из источника под малыми углами к горизонту, незначительно искривляются в сторону поверхности. Лучи, вышедшие под несколько большими углами, искривляются в сторону слоев с меньшей скоростью звука, в направлении дна. Между этими обеими группами лучей образуется зона акустической тени, называемая внешней. Другая зона тени — внутренняя — образуется ближе к источнику, располагаясь под ним (рис. 6).

Второй случай — скорость звука возрастает с глубиной — может иметь место в осенне-зимний период, когда поверхность моря отдает атмосфере больше тепла, чем получает от нее. Акустические лучи отклоняются в сторону более холодных слоев, т. е. в сторону поверхности моря, и концентрируются вблизи нее. Наблюдается так называемая положительная

рефракция. Лучи после рефракции могут отражаться от поверхности моря иногда даже многократно, причем такие отражения происходят практически без потерь акустической энергии (рис. 7). Условия работы гидроакустической аппаратуры при этом оказываются исключительно благоприятными.

Третий случай — скорость звука уменьшается с глубиной. Такое распределение скорости звука может возникнуть в весенне-летний период, когда в дневное время приповерхностный слой воды интенсивно прогревается солнцем. Из-за малой теплопроводности воды нижние (холодные) слои прогреваются медленно, и требуется много времени для

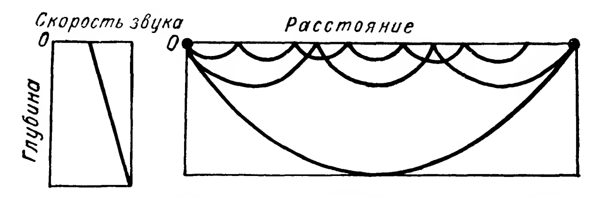


Рис. 7. Положительная рефракция акустических лучей

того, чтобы температура на глубине стала повышаться. В этих условиях акустические лучи резко искривляются в сторону дна — имеет место отрицательная рефракция (рис. 8). Образуются зоны акустической тени, создающие исключительно неблагоприятные условия работы гидроакустической аппаратуры.

В мелком море, при грунте дна, хорошо отражающем акустическую энергию, последняя после отражения попадает в зону тени, как бы «засвечивая» ее. За счет этого условия работы гидроакустической аппаратуры улучшаются. В некоторых случаях, между приповерхностным и глубинными слоями, имеющими сравнительно равномерное распределение скорости звука, образуется переходной слой с резким изменением скорости в его пределах. Такой слой называют *слоем скачка*. Из-за значительной рефракции, вызывающей расширение фронта акустической волны, и по некоторым другим причинам слой скачка вы-

зывает сильное ослабление интенсивности проходящих через него акустических волн (рис. 9). Условия гидроакустического наблюдения значительно ухудшаются.

Мы говорили о типичных случаях распределения скорости звука с глубиной, связанных с сезонными

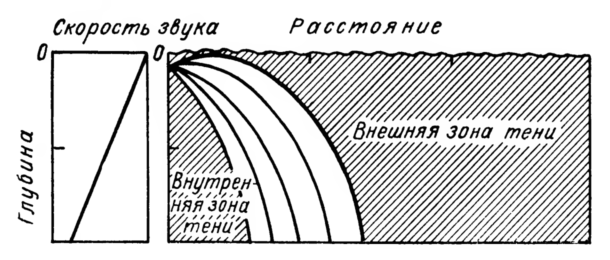


Рис. 8. Отрицательная рефракция акустических лучей

явлениями. Однако имеют место и суточные изменения распределения скорости звука. Конечно, последние менее существенны, но и с ними приходится счи-

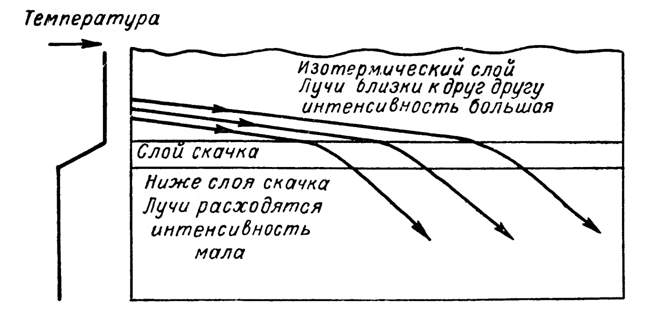


Рис. 9. Расширение фронта акустической волны при прохождении слоя скачка

таться. Суточные изменения касаются только приповерхностного слоя. Так, например, в спокойную жаркую погоду вода в этом слое во второй половине дня всегда будет более теплой, чем утром. За счет же остывания в ночные часы, утром в приповерхностном слое температура воды может стать более низкой, чем в нагретых более глубоких слоях, и т. п. Поэтому

для строгого учета влияния рефракции стремятся вести регулярные наблюдения за изменением распределения скорости звука с глубиной, проводя соответствующие замеры с интервалом, не превышающим нескольких часов.

Подводный звуковой канал. Чрезвычайно любопытным и примечательным является возникновение так называемого *подводного звукового канала*, связанное с рефракцией акустических лучей. Происходит это при таком распределении скорости звука, когда она сначала падает до некоторой глубины, а затем, достигнув минимального значения, начинает вновь возрастать с увеличением глубины.

Если на глубине, примерно соответствующей слою с минимальной скоростью звука, поместить источник акустических волн, излучаемые им колебания могут распространяться на очень большие расстояния. Так, известен случай, когда взрыв бомбы весом 22,5 *кг*, произведенный у берегов Австралии, был услышан на расстоянии 19 200 *км* в районе Бермудских островов. Этот путь, проходящий через весь Индийский и большую часть Атлантического океана, звук преодолел за 3 *ч* 43 *мин.*

Возможность сверхдальнего распространения звука в подводном звуковом канале определяется специфическим характером рефракции лучей. Слой с минимальной скоростью звука является осью канала. Если мы вспомним, что луч всегда отклоняется в сторону слоев с меньшей скоростью звука, нам нетрудно представить его траекторию. Луч, вышедший из источника под любым углом к горизонту, попадет в слои со скоростями, более высокими, чем на оси канала. Поэтому он начнет постепенно отклоняться к горизонтальному направлению, пока на какой-то глубине не произойдет его полное внутреннее отражение. После этого луч повернет в сторону оси канала, пересечет ось и вновь отклонится в сторону горизонта, вновь произойдет полное внутреннее отражение, и весь цикл будет непрерывно повторяться. Так как из источника обычно выходит пучок лучей с разными углами первоначального наклона к горизонту, то каждый отдельный луч будет описывать свою траекторию, а все вместе они будут

совершать общее перемещение вдоль оси подводного звукового канала (рис. 10). Образуется естественный волновод, ограниченный сверху и снизу слоями, в которых происходит полное внутреннее отражение лучей, имеющих максимальный угол наклона к горизонту при выходе из источника. Распространение лучей в канале происходит без потерь акустической энергии, что обеспечивает минимальное ослабление звука с расстоянием.

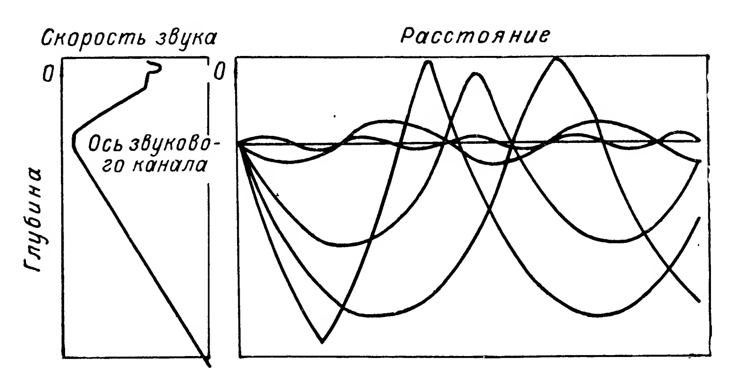


Рис. 10. Распространение акустических лучей в подводном звуковом канале

Каковы же условия, создающие возможность возникновения подводных звуковых каналов в океанах и морях? В некоторых случаях на глубинах 30—90 *м* может возникнуть приповерхностный канал, когда в весенне-летний период верхние слои воды постепенно прогреваются, но тепло еще не дошло до медленно остывающих за зиму глубинных слоев. Однако более значительную роль играет глубоководный канал, существующий практически во всех океанах и морях. Образуется он следующим образом. Верхние слои воды вследствие теплообмена с атмосферой прогреваются, и скорость звука уменьшается с глубиной. Температура воды не может уменьшаться непрерывно, и, достигнув некоторого минимального значения, соответствующего максимальной плотности воды и равного примерно 4° С, она остается практически постоянной. В то же время

гидростатическое давление продолжает возрастать с глубиной и становится основным фактором, определяющим изменение скорости звука. Скорость звука с глубиной растет. Общее распределение скорости звука с глубиной является результатом совместного действия изменения температуры воды и гидростатического давления (рис. 11). По мнению специалистов, явление подводного звукового канала сможет найти широкое применение, позволяя соз-

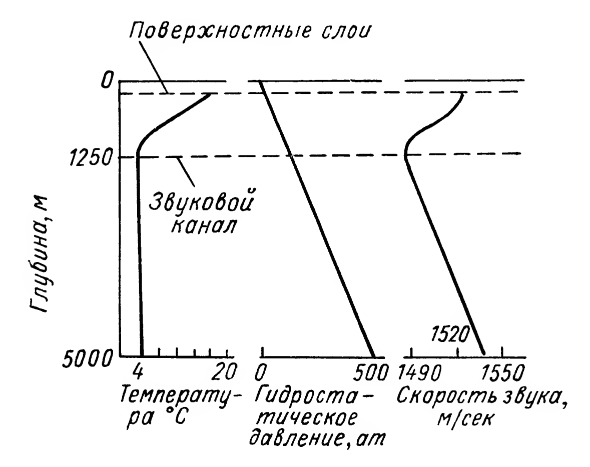


Рис. 11. Образование глубоководного подводного звукового канала

дать гидроакустические средства различного назначения, обладающие очень большими дальностями действия.

Заметим, что все рассуждения относительно влияния рефракции велись здесь относительно отдельных идеализированных акустических лучей. На самом деле такие лучи создать невозможно. Сколь бы узкий пучок акустической энергии не излучался, он имеет конечные угловые размеры, слагается как бы из большого числа отдельных лучей, выходящих каждый под своим углом из источника. Каждый такой «отдельный» лучик рефрагирует по-разному, в зависимости от своего первоначального угла выхода, и имеет свою самостоятельную траекторию. Распространение акустических сигналов оказывается

многолучевым. В точке пространства, где осуществляется их прием, акустическое поле является результатом интерференции отдельных составляющих лучей. В результате этого интенсивность суммарного сигнала может оказаться выше или ниже, чем в случае распространения звука в безграничной однородной среде, в которой отсутствует явление рефракции. Такое явление называют аномалией. Если интенсивность звука в точке приема в результате интерференции возрастает, говорят о положительной аномалии, если ослабевает — об отрицательной.

Как можно видеть, явление рефракции, вызываемое неравномерным распределением скорости звука с глубиной, приводит к большим различиям в условиях работы гидроакустической аппаратуры. В некоторых случаях эти условия улучшаются, в других, наоборот, эффективность гидроакустической техники снижается. Глубокое изучение и правильное использование особенностей распространения акустической энергии в море обеспечило значительные успехи гидроакустики за последние годы.

8. Реверберация

В точке излучения после распространения мощных акустических колебаний некоторое время можно наблюдать послезвучание, т. е. существование звучания уже после того, как источник акустических волн перестал действовать. Это характерное явление называется в акустике *реверберацией*. Реверберация длится от долей секунд до нескольких секунд и постепенно убывает по интенсивности. Наряду с ослаблением интенсивности реверберации происходит и ее флуктуация, т. е. беспорядочные отклонения от среднего значения, обусловленные интерференционными явлениями.

Реверберация является результатом рассеяния энергии акустических волн встречающимися на их пути различными небольшими неоднородностями — пузырьками газов и взвешенными в толще воды частицами (объемная реверберация), неровностями волнистой поверхности моря (поверхностная реверберация) или неровностями морского дна (донная реверберация). Каждое такое незначительное отра-

жение создает очень слабое эхо, а бесчисленное множество таких отражений и вызывает общее интенсивное звучание. По мере удаления акустических волн от точки излучения к ней возвращается все меньшая часть рассеянной энергии. Звучание реверберации ослабевает. Реверберация — вредное явление в гидроакустике, так как длительное и сильное послезвучание может полностью замаскировать слабый полезный сигнал. Для борьбы с реверберацией приходится применять специальные технические меры, например, использовать временную автоматическую регулировку усиления (ВАРУ), о принципе действия которой будет сказано несколько позже.

9. Акустические помехи

Реверберация является не единственной помехой работе гидроакустической аппаратуры. В воде полезный гидроакустический сигнал всегда прослушивается на фоне акустических помех различного происхождения. В некоторых случаях уровень помех может оказаться столь большим, что использование гидроакустических средств становится просто невозможным.

Для выделения полезного сигнала на фоне помех необходимо, чтобы между интенсивностями сигнала $I_с$ и помехи $I_п$ существовала зависимость $I_с \geqslant \delta^2 I_п$. Здесь δ — так называемый пороговый коэффициент, или коэффициент распознавания, величина которого зависит от заданной вероятности правильного приема сигнала.

Значительную акустическую помеху создает само море. Шум его, даже если оно совершенно спокойно, во много раз превышает шум в стоячей воде, а с увеличением волнения шум резко возрастает (рис. 12). Интенсивные шумы создают и многочисленные обитатели морских глубин. Известно, например, что небольшие «щелкающие» креветки, огромные колонии которых встречаются в южных морях, могут создать шум, напоминающий клепку паровых котлов пневматическими молотками. Однако еще более сильными, чем шумы моря, оказываются шумы, создаваемые кораблем, на котором установлена гидроакустическая

аппаратура, и называемые обычно собственными помехами. Источниками таких помех являются работающие судовые двигатели, гребные винты и вспомогательные механизмы, шумы которых передаются на акустические антенны через корпус корабля или через воду. Сильный шум возникает в результате вибрации корпуса корабля, вызванной обтеканием его встречными потоками воды. Этот шум называется гидродинамическим.

Уровень собственных помех зависит от скорости корабля, быстро возрастая с ее увеличением. По

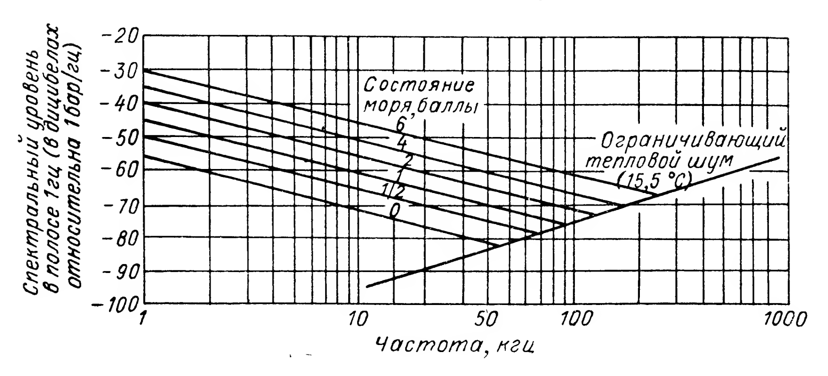


Рис. 12. Изменение уровня шума при различном волнении моря

мнению некоторых специалистов, давление собственных шумов растет пропорционально третьей степени скорости корабля. Это приводит к тому, что при движении корабля выше некоторой определенной скорости, полезный сигнал оказывается полностью замаскирован помехами, и работа гидроакустической аппаратуры становится невозможной. Борьба с акустическими помехами и выделение на их фоне слабых акустических сигналов является сложной технической задачей. Напомним, что к числу акустических помех относится и рассмотренная ранее реверберация.

10. Затухание звука с расстоянием

До сих пор мы рассматривали море как идеальную среду, в которой звук распространяется практически без потерь. К сожалению, это далеко не так.

В морской воде содержится бесчисленное множество пузырьков газов, захватываемых с поверхности моря при волнении или образующихся в результате жизнедеятельности различных организмов растительного и животного происхождения. Сами эти организмы иногда скапливаются в огромных количествах, создавая так называемые звукорассеивающие слои. В воде встречаются термические неоднородности. Оказавшись на пути звуковых волн, все эти неоднородности рассеивают и поглощают акустическую энергию. Поглощение вызывается также некоторыми сложными физическими процессами, происходящими в воде. В результате совокупного воздействия всех этих причин звук, распространяясь в морской воде, интенсивно затухает. Это затухание в 500—1000 раз больше затухания звука в дистиллированной воде, однако почти в 1000 раз меньше, чем в воздухе.

Экспериментально установлено, что затухание звука в море возрастает с увеличением частоты. Величина затухания характеризуется коэффициентом пространственного затухания, показывающим, как уменьшится интенсивность звука в децибелах при прохождении им единицы расстояния. Этот коэффициент может быть в самом общем виде выражен зависимостью

$$\beta = 0{,}036 f^{\frac{3}{2}}, \quad \text{дб/км},$$

где f — частота акустического сигнала, *кгц*.

О влиянии коэффициента пространственного затухания на интенсивность звука можно судить по следующему примеру (величины взяты приближенные): при прохождении расстояния 10 *км* интенсивность его уменьшается для частоты 10 *кгц* ($\beta = 1$ *дб/км*) в 10 раз, для частоты 45 *кгц* ($\beta = 10$ *дб/км*) в 10^{10} раз! Ослабление звука с расстоянием происходит и в результате расширения фронта акустической волны. Это явление было рассмотрено ранее. Так, при распространении сферической акустической волны интенсивность звука ослабевает пропорционально второй степени расстояния от источника звука.

Ослабление звука с расстоянием по обеим рассмотренным причинам может быть весьма существенным, поэтому всякое увеличение дальности действия аппаратуры связано с определенными, иногда очень значительными, трудностями. Таким образом, акустические колебания с интенсивностью в точке их возникновения I_0 при распространении в среде с затуханием β *дб/км* в виде сферических волн, на удалении R от источника будут иметь интенсивность

$$I_{\text{сигн}} = \frac{I_0}{4\pi R^2} 10^{-0{,}1\beta R},$$

а при гидролокации, когда звук проходит удвоенное расстояние R до цели,

$$I_{\text{гл}} = \frac{I_0}{16\pi^2 R^4} 10^{-0{,}2\beta R}.$$

Несмотря на столь существенные потери при распространении звука в море, акустическая энергия является на сегодняшний день единственным видом энергии, которая может быть использована в приборах обнаружения и связи под водой.

11. Эффект Доплера

Эффект Доплера — одно из явлений, связанных со спецификой распространения звука, которое легче всего наблюдать в повседневной жизни. Вряд ли кто-либо из читателей не наблюдал изменение высоты звука поезда, приближающегося к станции метро, или гудка локомотива, проносящегося без остановки мимо железнодорожной станции. При этом по мере приближения поезда высота звука возрастает, а после удаления его — понижается. Кажущееся изменение высоты звука, вызываемое относительным перемещением источника звука и наблюдателя, и называется эффектом Доплера. Заметим, что эффект Доплера присущ любым колебаниям, в том числе и радиоволнам, однако наиболее заметно он проявляется именно в акустике, где даже сравнительно небольшие скорости перемещения источника звука и наблюдателя оказываются сопоставимыми со скоростями распространения звука в воздухе или в воде.

Физически возникновение эффекта объясняется следующим образом. Если наблюдатель неподвижен, а источник звука движется в его сторону с некоторой скоростью v, то последний будет как бы догонять каждый гребень волны излучаемых им колебаний (рис. 13). Суммарная скорость распространения волн по направлению движения источника будет равна уже не c, а $c+v$. Соответственно длина волны

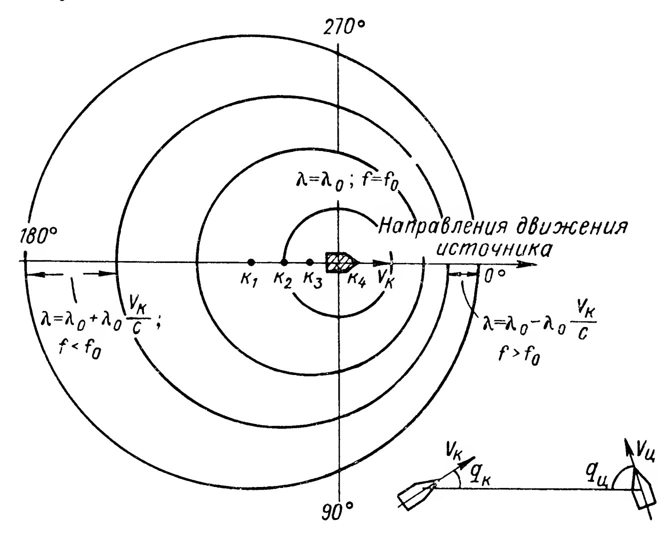


Рис. 13. Пояснение сущности эффекта Доплера

будет не λ_0, а $\lambda_1 = \lambda_0\left(1 - \frac{V}{c}\right)$ и, следовательно, частота колебаний, принимаемых наблюдателем, будет уже не f_0, а f_1, причем $f_1 > f_0$, т. е. наблюдатель будет слышать частоту более высокой, чем она излучается. Совершенно аналогично, в случае, если источник будет удаляться от наблюдателя, наблюдаемая частота f_1 будет ниже излучаемой f_0. Разность частот $\Delta f_д = f_1 - f_0$ называют доплеровским сдвигом частот. Если и наблюдатель будет двигаться со своей скоростью, то его сближение с источником вызовет дополнительное повышение слышимой частоты; удаление наблюдателя — понижение частоты. Если источник

и наблюдатель перемещаются не по одной прямой, то на доплеровский сдвиг будут влиять проекции их скоростей на соединяющую их прямую. В общем виде величина сдвига определяется выражением

$$\Delta f = 2f_0 \frac{V_к \cos q_к + V_ц \cos q_ц}{c},$$

где $V_к$ и $V_ц$ — скорости источника и наблюдателя, $q_к$ и $q_ц$ — курсовые углы, т. е. углы между направлениями движения и прямой, соединяющей источник и наблюдателя; c — скорость звука; f_0 — частота, излучаемая источником звука.

Из формулы можно видеть, что доплеровский сдвиг может меняться от 0 (при $V_к=0$ и $V_ц=0$ или при $q_к=90°$ и $q_ц=90°$) до $+2f_0\frac{V_к+V_ц}{c}$ (при встречном движении) или $-2f_0\frac{V_к+V_ц}{c}$ (при движении в противоположных направлениях).

Наличие доплеровского сдвига в принимаемом сигнале при гидролокации позволяет получить дополнительную информацию о цели, показывая, что обнаруженный объект движется. Однако это явление оказывается и крайне нежелательным, так как для приема излученного сигнала приходится значительно расширять полосу пропускания приемного тракта. В свою очередь, расширение полосы пропускания неизбежно сопровождается повышением уровня помех, ухудшением распознаваемости полезного сигнала на их фоне и, в конечном счете, уменьшением дальности действия аппаратуры. Для устранения влияния эффекта Доплера или, как говорят, для его компенсации в аппаратуре приходится принимать специальные технические меры.

12. Некоторые итоги

Итак, мы рассмотрели некоторые явления и особенности распространения акустических волн в океанах и морях. Напомним их читателю в виде кратких итогов и выводов.

1. Море как звукопроводящая среда характеризуется крайней неоднородностью и изменчивостью акустических свойств во времени и пространстве.

2. Скорость звука в воде невелика (в среднем около 1500 *м/сек*) и может меняться в широких пределах в зависимости от температуры, солености воды и гидростатического давления.

3. Распределение скорости звука с глубиной и соответственно акустических свойств воды сопровождается явлением рефракции (искривления) звуковых лучей.

4. В результате рефракции лучи всегда изменяют свое направление в сторону слоев с меньшей скоростью звука.

5. Рефракция акустических лучей в значительной степени определяет характер распространения акустических волн в океанах и морях, способствуя повышению или снижению эффективности гидроакустической аппаратуры.

6. Наиболее замечательным проявлением рефракции является возникновение подводного звукового канала.

7. Рассеяние излученной звуковой энергии многочисленными неоднородностями, имеющимися в морской среде, вызывает нежелательное явление интенсивного послезвучания или реверберации.

8. Полезный сигнал в гидроакустике всегда принимается на фоне интенсивных помех, создаваемых морем и кораблем, на котором установлена приемная аппаратура.

9. Акустический сигнал, распространяясь в воде, испытывает сильное пространственное затухание, причем величина затухания возрастает с увеличением частоты сигнала.

10. При распространении акустический сигнал ослабевает с расстоянием за счет расширения фронта волны.

11. При распространении акустического сигнала в воде он претерпевает значительный доплеровский сдвиг частоты, что в конечном счете приводит к ухудшению помехоустойчивости аппаратуры.

12. Распространяясь в морской среде, акустические сигналы подвергаются воздействию рассмотренных выше специфических факторов, большинство которых не имеет места при распространении радиоволн и других видов колебаний.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Итак, поскольку гидроакустическая аппаратура основана на использовании звуковых колебаний, в ее состав обязательно должны входить устройства для излучения и приема акустических волн — акустические антенны. Назначение их аналогично назначению антенн любых других радиотехнических устройств. При излучении они преобразуют энергию переменного электрического тока, поступающего от генератора, в энергию звуковых волн; при приеме — энергию звуковых волн в энергию электрического тока. Таким образом, по характеру происходящих в них процессов акустические антенны являются электроакустическими преобразователями. К акустическим антеннам применим принцип взаимности — как правило, они могут работать как в передающем, так и в приемном режимах. Однако в ряде случаев их используют только передающими или только приемными.

13. Особенности акустических антенн

Конструкция акустических антенн может быть самой различной — от простейшей, состоящей из одного преобразователя, до довольно сложного устройства, включающего большое число активных элементов — преобразователей, экраны, отражатели, кабельные коробки и т. п. В дальнейшем мы будем называть электроакустическим преобразователем активный элемент, действующий самостоятельно или входящий в состав антенны, а под антенной будем понимать комбинацию преобразователей со всеми сопутствующими им элементами.

Заметим сразу, что излучение и прием акустических волн можно осуществлять не только электроакустическими преобразователями, но и различными устройствами, основанными на иных принципах преобразования энергии. Так, например, довольно широко применяются взрывные источники звука; существуют гидравлические, пневматические, искровые и некоторые другие излучатели. Однако рассмотре-

ние их принципа действия выходит за рамки настоящей книги.

Различные электроакустические преобразователи в виде микрофонов, громкоговорителей, телефонов широко используются в радиотехнике и, несомненно, хорошо знакомы любому радиолюбителю. Однако электроакустические преобразователи, применяемые в гидроакустике, по условиям своей работы и по конструкции существенно отличаются от своих «собратьев», работающих в воздухе. Из-за разницы в акустических сопротивлениях среды при создании звука одинаковой интенсивности на электроакустический преобразователь, работающий в воде, действует сила, в 60 раз превышающая силу, воздействующую на него в воздухе, при этом амплитуды смещения и скорости колеблющейся поверхности в воде будет в 60 раз меньше, чем в воздухе. По этой причине при излучении колебаний в гидроакустике приходится создавать мощности, во много раз превышающие мощности, используемые в воздухе, а при приеме, наоборот, использовать мощности, много меньшие, чем мощности сигналов атмосферной акустики.

При работе в воде на мембрану преобразователя действует значительное гидростатическое давление, которое может меняться в значительных пределах в случае погружения антенны на глубину. Так, даже для простейших гидроакустических устройств, используемых пловцами-акванавтами, гидростатическое давление может меняться от 0 до 20 и более $кг/см^2$, а для антенн глубоководных аппаратов (батискафов или экспериментальных подводных лодок) давление может доходить до нескольких десятков и даже сотен атмосфер! Таким образом, если при работе в воздухе статическое давление меняется в пределах единиц процентов, при работе в воде оно может меняться в сотни раз.

Наконец, при излучении мощных акустических волн в воде на поверхности преобразователя может возникнуть явление кавитации, не имеющее места при работе в воздухе. Суть его заключается в том, что частицы воды как бы не успевают за поверхностью излучателя, колеблющейся с большой ампли-

тудой. Общее давление (звуковое плюс гидростатическое) на поверхности становится отрицательным. Образующиеся при этом полости, называемые кавитационными, заполняются парами воды или пузырьками газа. В следующие моменты эти полости захлопываются с сильным шумом. От ударов поверхность излучателя может разрушиться. С момента возникновения кавитации дальнейшее увеличение излучаемой мощности не происходит, даже если мощность, подводимая к излучателю, продолжает увеличиваться. На конструкцию гидроакустических антенн в целом влияет также разница в длинах волн акустических колебаний в воздухе и воде.

Физические принципы преобразования акустической энергии в электрическую, и наоборот, используемые в гидроакустике, могут быть самыми различными. Однако наибольшее распространение получили магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи, рассмотрением которых мы и ограничимся.

14. Магнитострикция и магнитострикционные преобразователи

Существует довольно большая группа материалов, называемых ферромагнетиками, которые, если их поместить в магнитное поле, изменяют свои размеры, или, как говорят, испытывают линейную деформацию. Такое явление называют прямым магнитострикционным эффектом.* Деформация может происходить, в зависимости от используемого материала, вдоль магнитных силовых линий или поперек их и называется соответственно продольной или поперечной. Если в результате деформации размеры тела увеличиваются, деформацию называют положительной, если уменьшаются — отрицательной. Если тело, изготовленное из ферромагнетика, поместить в магнитное поле и подвергнуть воздействию механической силы — деформировать его, магнитное состояние тела изменится и, в конечном счете, изменится магнитное поле. Будет иметь место обратный магнитострикционный эффект.

---

* Заметим, что в некоторых случаях в литературе встречаются и прямо противоположные наименования магнитострикционных эффектов, т. е. то, что в настоящей книге называется прямым, называют обратным, и наоборот.

К числу ферромагнетиков относятся железо, никель, кобальт, некоторые их сплавы, а также ферриты. Магнитострикционные свойства различных материалов выражаются по-разному. На рис. 14 приведены кривые, показывающие зависимость линейной деформации стержня (отношения приращения Δl к первоначальной длине стержня l) для некоторых наиболее

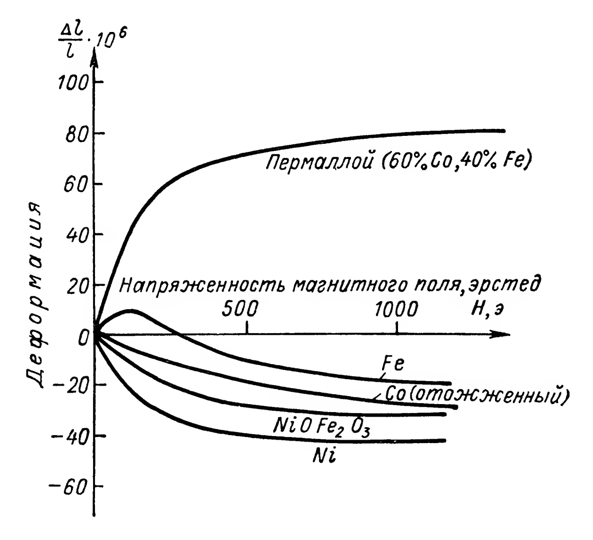


Рис. 14. Зависимость деформации различных ферромагнитных материалов от напряженности магнитного поля

распространенных ферромагнетиков от изменения величины напряженности H прикладываемого магнитного поля. Как видно из рисунка, наиболее сильно магнитострикционный эффект выражен у никеля и пермаллоя. Стержень из никеля под влиянием приложенного магнитного поля укорачивается (продольная отрицательная деформация), из феррита — удлиняется (продольная положительная деформация), железо в слабом магнитном поле имеет положительную, а в сильном — отрицательную деформацию. При очень больших напряженностях магнитного поля у всех материалов наступает насыщение, и дальнейшее увеличение деформации прекращается. Заметим, что

даже у никеля изменение первоначальной длины в результате явления магнитострикции на превышает стотысячных долей.

Прямой магнитострикционный эффект используется при излучении гидроакустических сигналов. Если взять стержень из магнитострикционного материала и поместить его внутри обмотки, через которую пропустить переменный ток с частотой ω, создаваемое в обмотке магнитное поле будет меняться по закону $H = H_m \cdot \sin\omega t$ и, воздействуя на стержень, заставит его совершать колебания. При этом линейные размеры стержня будут меняться по закону

$$\Delta l = \alpha\mu^2 H_m^2,$$

где H_m — амплитуда напряженности переменного магнитного поля с частотой ω; α — магнитострикционная постоянная — коэффициент, зависящий от материала стержня (для никеля $\alpha = 4$); μ — магнитная проницаемость стержня.

Напомним, что направление деформации для никеля не зависит от направления магнитного поля, а величина деформации зависит лишь от амплитуды напряженности магнитного поля H_m. Поэтому за один период изменения напряженности магнитного поля стержень совершит два периода колебаний, т. е. частота равна удвоенной частоте 2ω колебаний подводимого переменного тока. Это положение наглядно иллюстрирует рис. 15.

Если к обмотке подводится не только переменный ток, но и постоянный ток поляризации или происходит подмагничивание стержня постоянным магнитом, образуется суммарное магнитное поле, изменяющееся по закону

$$H_\Sigma = H_0 + H_m \cdot \sin\omega t,$$

где H_0 — напряженность магнитного поля поляризации.

Если $H_0 > H_m$, амплитуда напряженности суммарного поля будет меняться по закону подводимого переменного напряжения. По этому же закону будет меняться и длина стержня, т. е. он будет колебаться с частотой подводимого напряжения ω (рис. 16).

Для поляризованного излучателя магнитострикционная постоянная σ зависит от величины постоянного поляризующего поля и достигает максимального значения $(1,5 \div 2) \cdot 10^4$ *дин/см²гс* при напряженности поля поляризации $10 \div 20$ *э*.

При приеме, когда на поляризованный стержень действует внешняя сила, вызывающая его деформа-

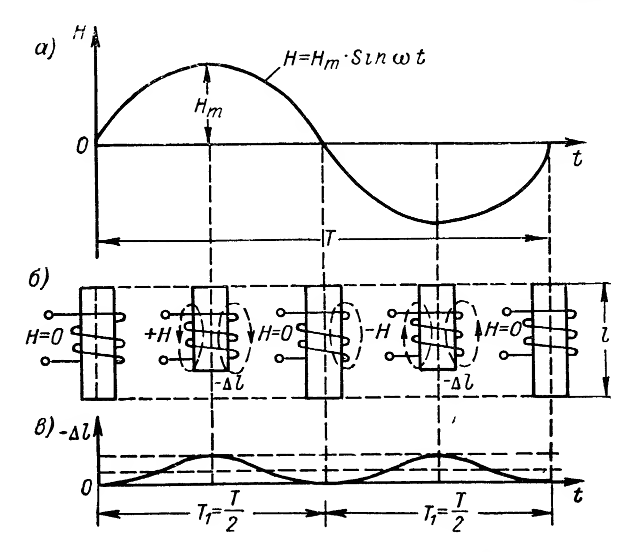


Рис. 15. Прямой магнитострикционный эффект при отсутствии поляризации: *а* — напряженность магнитного поля; *б* — колебания никелевого стержня; *в* — деформация стержня

цию, напряженность магнитного поля изменяется по закону

$$H = 4\pi\sigma \frac{\Delta l}{l}, \ э.$$

В обмотке стержня будет индуцироваться э. д. с., в период нарастания магнитного поля отрицательная, а уменьшения — положительная. Частота электрических колебаний при этом равна частоте, воздействующих на стержень акустических колебаний (рис. 17). Так как амплитуда переменной напряженности магнитного поля при приеме слабых сигналов оказы-

вается очень небольшой, поле поляризации тоже может быть малым. Поэтому, если в обмотку при излучении был подан ток поляризации, то при переходе в приемный режим в стержне сохранится достаточный для работы остаточный магнетизм. Если магнито-

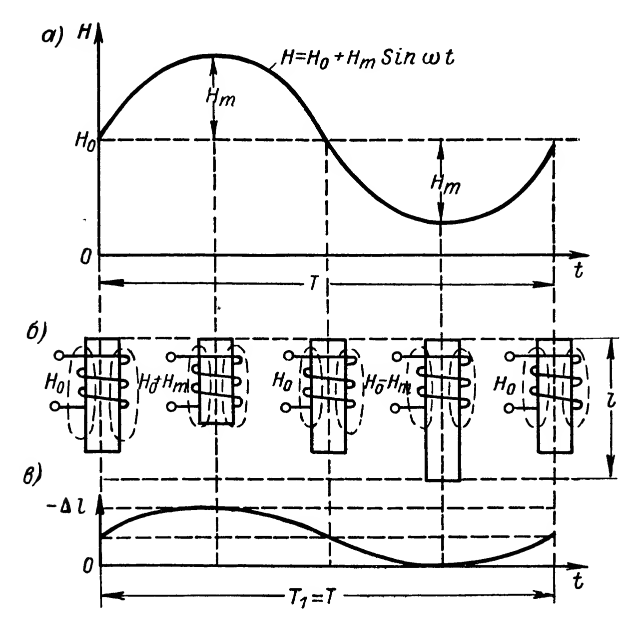


Рис. 16. Прямой магнитострикционный эффект при наличии поляризации: *а* — напряженность магнитного поля; *б* — колебания никелевого стержня; *в* — деформация стержня

стрикционный преобразователь работает только как приемник, для его поляризации может использоваться поле постоянного магнита.

Конструкции магнитострикцинных преобразователей весьма разнообразны. Обычно колебательная система преобразователей изготовляется из тонких, толщиной 0,05—0,2 *мм*, отожженных пластин никеля. Оксидная пленка, образующаяся на их поверхности при обжиге, изолирует пластины друг от друга и уменьшает потери на вихревые токи.

По форме колебательных систем преобразователи могут быть стержневыми и цилиндрическими. Стержневая колебательная система имеет форму сердечника с окнами, внутри которых пропускается обмотка,

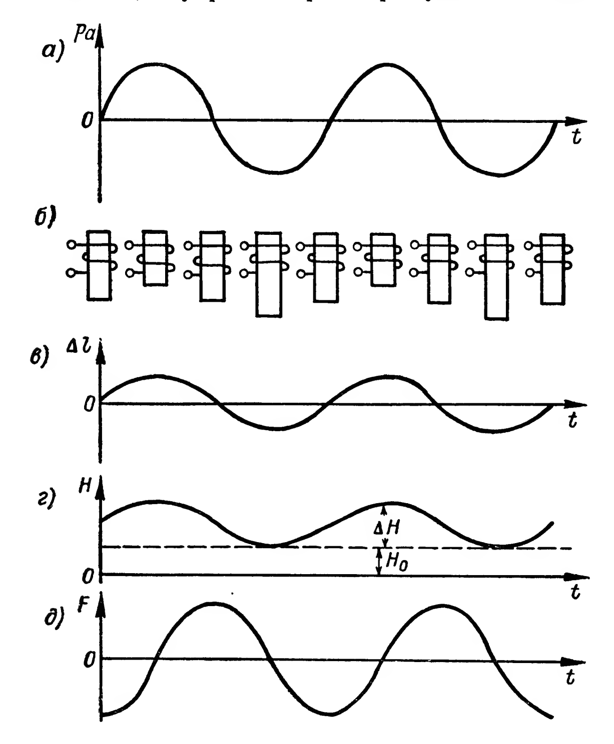


Рис. 17. Обратный магнитострикционный эффект: *а* — давление падающей акустической волны; *б* — колебания никелевого стержня; *в* — деформация стержня; *г* — напряженность магнитного поля; *д* — э. д. с. в обмотке стержня.

и может быть представлена состоящей из стержней с накладками на концах (рис. 18). Масса накладок, определяемая их размерами, влияет на резонансную частоту системы. Если в обмотку подать постоянный ток поляризации и переменный ток, стержни будут совершать колебания с частотой подводимого напряжения. Колебательная система помещается в герме-

тический корпус так, чтобы одна из ее сторон, перпендикулярная к стержням, находилась внутри корпуса и соприкасалась с воздухом, а другая находилась вне корпуса и соприкасалась с водой. Эта сторона будет являться приемно-излучающей поверхностью преобразователя. Из-за малого волнового сопротивления воздуха сторона системы, обращенная внутрь корпуса, практически не излучает. Нагрузка колеблющихся стержней оказывается односторонней.

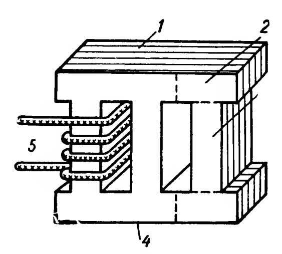


Рис. 18. Стержневой магнитострикционный преобразователь

1 — рабочая (приемо-излучающая) поверхность; *2* — накладка; *3* — стержень; *4* — сердечник; *5* — обмотка (показана только на одном стержне)

При проектировании преобразователей параметры колебательной системы выбираются такими, чтобы ее собственная резонансная частота была равна частоте подводимых к преобразователю электрических колебаний. Резонансная частота колебательной системы зависит от использованного для ее изготовления материала и размеров стержней и накладок. Важнейшим параметром, характеризующим излучатель, является создаваемая им акустическая мощность $w_а$. Она составляет лишь часть подводимой к преобразователю электрической мощности $w_э$. Это объясняется тем, что электрические колебания первоначально преобразуются в колебания механической системы, а затем уже в акустические, и каждое преобразование сопровождается потерями. Эти потери характеризуются соответствующими к. п. д.: электромеханическим $\eta_{э.м}$, механико-акустическим $\eta_{м.а}$ и электроакустическим $\eta_{э.а}$, между которыми имеется следующая связь:

$$\eta_{э.\,а} = \eta_{э.\,м} \cdot \eta_{м.\,а} = \frac{w_а}{w_э}.$$

Электроакустический к. п. д. магнитострикционных излучателей составляет 30—50%. Заметим, что излучаемая акустическая мощность будет возрастать с увеличением подводимой электрической мощности лишь до определенных пределов, пока не возникнет явление кавитации. При дальнейшем увеличении

подводимой электрической мощности акустическая мощность не возрастает. Кавитация наступает при определенной величине акустической мощности, называемой максимальной удельной акустической мощностью $w_{\text{а. уд. } m}$. Для импульсов средней продолжительности $w_{\text{а. уд. } m}$ равна примерно 2 *вт/см*². Иногда

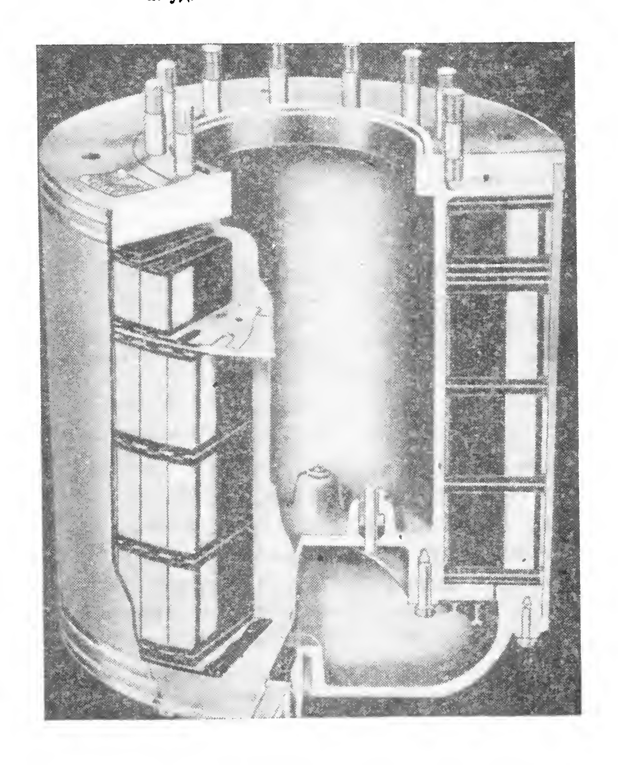


Рис. 19. Цилиндрический магнитострикционный преобразователь

эту величину называют также интенсивностью излучателя.

При работе преобразователя в приемном режиме падающие на рабочую поверхность акустические волны вызывают изменения длины стержней и в нанесенных на стержни обмотках возникает э. д. с. Важнейшими параметрами приемника являются его

чувствительность — величина, характеризующая связь между давлением P_m падающей на принимающую поверхность волны и э. д. с. E_m, возникающей на выходе приемника, и равная отношению E_m/P_m *мкв/бар*, а также частотная характеристика, особенно при необходимости приема широкополосных сигналов.

Наряду со стержневыми в гидроакустических станциях широко применяются и цилиндрические преобразователи. Они представляют собой полые цилиндры, состоящие из отдельных секторных пакетов, которые, в свою очередь, набираются из никелевых пластин. Пакеты имеют окна, в которых размещена обмотка (рис. 19). Каждый пакет можно представить в виде стержневой колебательной системы с непараллельными стержнями, поэтому физические процессы, происходящие в цилиндрическом и стержневом преобразователях, аналогичны. При излучении все пакеты работают одновременно, и деформация стержней вызывает радиальные колебания цилиндра, возбуждая цилиндрические акустические волны. При приеме обычно каждый пакет работает самостоятельно и представляет собой отдельный приемник. Магнитострикционные преобразователи могут иметь и другую конструкцию. Так, например, широко распространены магнитострикционные трубчатые приемники.

15. Пьезоэлектрический эффект и пьезоэлектрические преобразователи

Если подвергнуть некоторые кристаллы давлению, на их гранях возникают электрические заряды. Если эти же кристаллы поместить в электрическое поле, они испытывают линейную деформацию. Эти явления называются соответственно *обратным и прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Если деформация кристалла происходит в направлении приложенного электрического поля, а заряды возникают на гранях кристалла, перпендикулярных направлению приложенного механического усилия, говорят о *продольном пьезоэффекте*. Если деформация перпендикулярна приложенному полю, а заряды возникают на гранях, параллельных приложенному усилию — *о поперечном*.

Пьезоэффект наблюдается в различных кристаллах, имеющих одну или несколько полярных осей и не имеющих центра симметрии. Число таких кристаллов, называемых пьезоэлектриками, достигает нескольких сотен. Сюда входят как естественные кристаллы, встречающиеся в природе, так и искусственные, созданные в лабораторных условиях. Однако практическое применение в гидроакустике находят лишь некоторые из них. В первых гидроакустических станциях, а сейчас в некоторых измерительных приборах, нашел применение природный кристалл — кварц. Однако из-за многих отрицательных свойств: сравнительной дороговизны, высокой механической прочности, затрудняющей обработку, малых размеров кристаллов, кварц сравнительно быстро был вытеснен искусственными материалами.

Одним из наиболее широко применяемых искусственных пьезоэлектриков явилась сегнетова соль. По ряду параметров соль уступает кварцу: она легко растворяется в воде, что особенно нежелательно для гидроакустики, имеет малую механическую и электрическую прочность, не обладает температурной стойкостью. Но все эти недостатки в значительной степени компенсируются простотой и дешевизной выращивания кристаллов даже самых больших размеров, легкостью их обработки — кристаллы можно резать смоченной в воде ниткой, а главное, ярко выраженными пьезоэлектрическими свойствами, во много раз превосходящими кварц.

В электроакустических преобразователях используется не весь кристалл пьезоэлектрика, а вырезанные из кристалла пластинки. При этом вырезают их не произвольно, а перпендикулярно или под определенными углами к так называемым кристаллографическим осям. Выбор направлений среза обусловлен тем, что свойства пластинки оказываются различными в зависимости от первоначального положения ее в кристалле. В гидроакустике наиболее употребителен так называемый срез *«а»*, у которого пара граней пластинки оказывается перпендикулярной оси *a* кристалла, а другие пары граней располагаются под углами 45° к осям *b* и *c* (рис. 20). Если вырезать пластинку, перпендикулярную всем трем осям, на ее грани,

перпендикулярные оси a, наложить электроды и к ним подвести электрическое напряжение, в пластинке возникнет деформация сдвига (рис. 21). Она примет форму ромба. Практическое использование подобной деформации оказывается затруднительным. Однако если вырезать брусок с большой осью, располагающейся вдоль диагонали пластинки, длина этого бруска под воздействием приложенного поля начнет изменяться. Брусок будет совершать поперечные относительно направления поля колебания. Вдоль оси бруска возникнет механическое усилие $p=eE$, где e — пьезоэлектрическая постоянная (в рассматриваемом

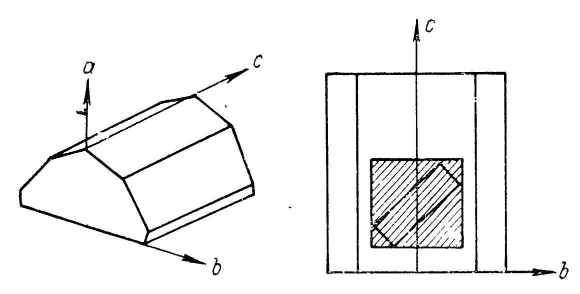


Рис. 20. Кристалл сегнетовой соли и расположение пластинки среза «*a*» в нем

случае $e=1{,}2\cdot10^6$), $E=\frac{U}{l}$ — электрическое поле, U — напряжение между электродами, l — толщина бруска.

Если под воздействием приложенного внешнего механического усилия произойдет деформация бруска, и его длина l изменится на величину Δl, на его обкладках возникнет электрическое поле

$$E=\frac{4\pi e}{\varepsilon}\cdot\frac{\Delta l}{l},\ \text{в/см}.$$

Здесь ε диэлектрическая постоянная зажатого кристалла.

Конструктивно пьезоэлектрические преобразователи представляют собой пакеты, набранные из отдельных пластин сегнетовой соли с обкладками из фольги, соединенных в параллель (рис. 22). С увеличением числа пластин возрастает чувствительность

приемника. Из-за растворимости сегнетовой соли непосредственный контакт пакетов с водой невозможен. Поэтому их помещают в герметизированный корпус и заливают гидроизолирующим веществом, имеющим акустические свойства, близкие к акустическим свойствам воды. Колебания, поступающие из воды, попадают на пакет через мембрану, являющуюся частью корпуса. Из-за малой электрической прочности, не позволяющей подводить высокие напряжения, преобразователи из сегнетовой соли используются обычно только в качестве приемников.

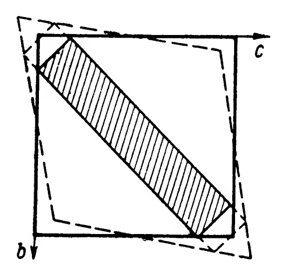


Рис. 21. Деформация сдвига пластинки сегнетовой соли и положение бруска с 45° срезом.

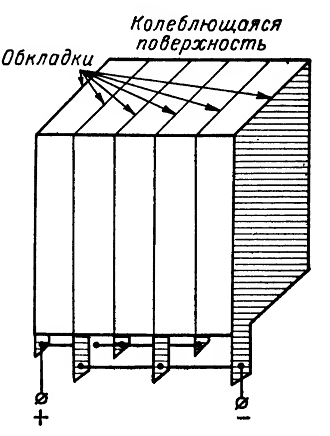


Рис. 22. Пакет, набранный из пластин сегнетовой соли

В гидроакустике применяются и другие искусственные кристаллы, в частности, дигидрофосфат аммония. По величине пьезоэффекта этот материал уступает сегнетовой соли, но превосходит кварц. Его важнейшим преимуществом является электрическая прочность, позволяющая использовать преобразователи не только в режиме приема, но и в режиме излучения.

16. Пьезокерамические преобразователи

В современной гидроакустической технике используются преобразователи различной формы и размеров. Изготовление их из кристаллов пьезоэлектриков в ряде случаев оказывается затруднительным, а ино-

гда и просто невозможным. В связи с этим за последние десятилетия для изготовления гидроакустических преобразователей стали все более широко применяться так называемые пьезокерамические материалы. Они по физическим принципам своего действия являются пьезоэлектриками, однако существенно отличаются от кристаллов по способу своего изготовления и обработки.

Одним из наиболее распространенных пьезокерамических материалов является титанат бария. Крупные кристаллы этого вещества в природе не встречаются, да и в лабораторных условиях их удается вырастить лишь очень небольшими. Поэтому при изготовлении из него преобразователей поступают следующим образом. Исходные материалы прессуют в виде брикетов и подвергают предварительному обжигу при температуре не ниже 1300° С. При этом и образуется сам титанат бария как химическое соединение. Полученный полуфабрикат дробят и мелют в порошок. После этого, добавив в необходимых количествах связующее вещество, прессованием или литьем изготовляют детали необходимой формы. Если таким путем не удается получить деталь требуемой формы, заготовка может подвергнуться механической обработке, например, обточке. Затем детали вновь подвергают обжигу при температуре 1350—1450° С и на их поверхность наносят слой серебра, являющийся в последующем электродом.

Изготовленная деталь имеет поликристаллическую структуру, т. е. состоит из огромного количества отдельных кристалликов, каждый из которых произвольно ориентирован в пространстве. Если теперь деталь поместить в сильное постоянное электрическое поле напряженностью 1,5—2 *кв/мм*, произойдет ориентация кристаллов в направлении приложенного поля, которая сохранится и после прекращения действдействия поля. Произойдет поляризация пьезоэлемента. В элементах и деталях, изготовленных из пьезокерамики может быть получен прямой и обратный, продольный и поперечный пьезоэффект. По своим пьезосвойствам керамика близка к кварцу.

Для изготовления преобразователей больших размеров и сложных акустических антенн отдельные

элементы из пьезокерамики могут склеиваться в изделия нужной формы и размеров. Высокая механическая прочность и влагостойкость керамики делают ее особенно ценной для использования в гидроакустике. Кроме титаната бария, могут применяться и другие пьезокерамические материалы.

17. Направленное действие акустических антенн

Применяемые в гидроакустике антенны, как правило, обладают направленностью действия. У таких антенн излучаемая энергия концентрируется в определенном направлении, при отклонении от которого интенсивность излучаемого сигнала значительно ослабляется, уменьшаясь до нуля. При приеме уровень сигнала на выходе антенны оказывается максимальным, если антенна определенно ориентирована относительно цели, и уменьшается по мере изменения положения антенны относительно направления на цель. Явление направленности — результат интерференции акустических колебаний, приходящих на отдельные преобразователи или на отдельные участки поверхности антенны.

Направленность антенны при излучении позволяет наиболее рационально использовать излучаемую энергию, при приеме — определять направление на источник сигнала и обеспечивать существенное повышение помехоустойчивости аппаратуры. Направленное действие антенны определяется ее диаграммой или характеристикой направленности, а также ее коэффициентом концентрации. Диаграмма в полярных или прямоугольных координатах и выражает графическую зависимость интенсивности или давления сигнала от изменения направления относительно антенны. Характеристика направленности выражает эти же зависимости аналитически.

На рис. 23 приведена диаграмма направленности акустической антенны, выполненная в различных системах координат. Как можно видеть, диаграмма вытянута в направлении, по которому измеряемая величина имеет максимальное значение A_0. Это направление называют осью главного максимума.

Идеальная диаграмма всегда симметрична относительно этой оси, у реальных антенн симметрия по разным причинам может быть несколько нарушена. По мере отклонения от оси измеряемая величина уменьшается, достигая нуля при угле отклонения Θ/2. Величина угла Θ называется шириной главного максимума. Чем меньше Θ, тем больше острота направленного действия антенны.

Помимо главного или основного максимума диаграмма направленности может иметь и боковые лепестки, число и амплитуда которых различны. В не-

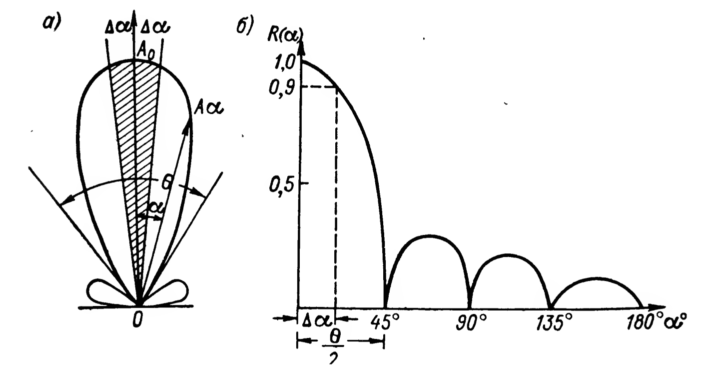


Рис. 23. Диаграмма направленности акустической антенны: *а* — в полярных, *б* — в прямоугольных координатах

которых случаях могут образоваться боковые максимумы, амплитуда которых равна амплитуде главного. Такие максимумы называют добавочными. Правильно сформированная диаграмма направленности должна содержать минимальное число небольших по величине боковых лепестков.

Важное значение имеет угол Δα, называемый остротой главного максимума. Ему соответствует некоторое малое заданное изменение величины *A*. Так, например, при приеме сигнала на слух человек может заметить изменение громкости звука, если она будет отличаться примерно на 0,1 от ее первоначального значения. При меньших отклонениях громкость сигнала будет казаться оператору постоянной. Следовательно, если изменение уровня сигнала на 0,1 будет происходить в пределах угла Δα, за направление

на цель может быть принято любое направление, лежащее в пределах этого угла, и величина $\Delta\alpha$ определит возможную максимальную ошибку пеленгования.

Аналитически направленность характеризуется зависимостью $R(\alpha) = A_\alpha/A_0$, где A_α — значение измеряемой величины по направлению α относительно оси, для которой имеет место значение A_0. Эта зависимость называется характеристикой направленности. Диаграмма направленности и является графиком этой зависимости. Если известны значения A_0 и функция $R(\alpha)$, то для любого направления α можно получить величину $A_\alpha = A_0 \cdot R(\alpha)$.

Диаграмма направленности может быть определена для любой плоскости, проходящей через ось антенны. Обычно их строят для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Эти диаграммы в общем случае могут быть разными. Направленность антенны в пространстве характеризуется поверхностью направленности, представляющей собой объемную фигуру, построенную на диаграммах направленности, найденных для двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

Если взять направленную акустическую антенну, работающую в режиме излучения, нетрудно представить, что создаваемая ею акустическая энергия будет концентрироваться вблизи оси главного максимума диаграммы направленности. Интенсивность звука в точке, лежащей на расстоянии R от антенны, окажется равной I. У ненаправленного источника акустической энергии такой же мощности, на удалении R от него интенсивность оказывается значительно меньшей и равняется I_0. Отношение $\gamma = I/I_0$, характеризующее различие в интенсивностях, создаваемых направленным и ненаправленным источниками на одинаковых удалениях от точки излучения, называется *коэффициентом осевой концентрации антенны.* В радиотехнике аналогичный коэффициент называют коэффициентом направленного действия антенны.

Если взять источник акустической энергии мощностью w_a, создающий сферические волны, то на

расстоянии R от него интенсивность звука

$$I = \frac{w_a \cdot \gamma}{4\pi R^2} 10^{-0,1\beta R}.$$

Если сравнить два источника одинаковой мощности: направленный и ненаправленный ($\gamma=1$), то можно видеть, что направленный источник создаст в рассматриваемой точке интенсивность звука, в γ раз большую, или же сможет создать одинаковую с ненаправленным источником интенсивность при мощности, в γ раз меньшей. Следовательно, высоконаправленная излучающая антенна позволяет более эффективно, чем ненаправленная, использовать мощность источника звука, что является весьма важным ее преимуществом.

Исключительно большое значение имеет направленность антенн и при приеме. В этом случае на ненаправленную антенну будут поступать акустические помехи из всего окружающего пространства, а на направленную — только из части пространства, охваченной диаграммой направленности. Коэффициент концентрации показывает при приеме, во сколько раз уровень помех на входе направленной антенны будет меньше, чем на входе ненаправленной.

Величина коэффициента концентрации может быть рассчитана по формуле

$$\gamma = \frac{4\pi S}{\lambda^2} = \frac{4\pi S f^2}{c^2},$$

где S — площадь поверхности антенны, c — скорость звука, f — рабочая частота, λ — длина волны. Как видно из формулы, коэффициент концентрации может быть увеличен либо за счет увеличения размеров антенны, что не всегда возможно, так как это приводит к увеличению габаритов и веса аппаратуры и затрудняет ее размещение на кораблях, либо за счет повышения рабочей частоты, что, как уже было показано, приводит к значительному затуханию акустической энергии и к уменьшению дальности действия аппаратуры. На практике используют оба эти пути. Так, в любительской и другой малогабаритной аппаратуре, где не требуется большая дальность действия, используют высокие частоты и малогабарит-

ные антенны. В корабельной и позиционной аппаратуре, обладающей очень большой дальностью действия и работающей на низких частотах, размеры антенн могут быть очень большими.

18. Формирование диаграммы направленности

Итак, рассмотрим, за счет чего образуется направленность акустических антенн и каким образом оказывается возможным создать диаграмму направленности нужной формы. Ранее уже мы показали, что в результате интерференции колебаний, создаваемых двумя точечными источниками, амплитуда результирующего колебания будет меняться в зависимости от положения точки приема в пространстве относительно излучателей. Это изменение амплитуды и характеризует направленность рассмотренной комбинации излучателей.

Возьмем n ненаправленных излучателей, расположенных на одной линии на расстоянии d один от другого, и с помощью приемника будем наблюдать, как изменяется давление в различных точках окружающего пространства. Если поместить приемник по нормали к центру линии излучателей, можно видеть, что давление в этой точке приема будет максимальным.

Это направление и примем за осевое. Перемещая приемник по окружности с центром в середине линии излучателей, можно наблюдать, что давление в точке приема будет изменяться по закону

$$R_1(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda}\sin\alpha\right)}{n\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\alpha\right)},$$

где α — угол между осью базы и направлением на приемник. Очевидно, меняя значение этого угла, можно получить распределение давления для любых

направлений. При $\alpha=0$ и $d \sin\alpha=0$, т. е по направлению нормали к центру линии излучателей, $R(\alpha)=1$ и давление максимально; при $d\sin\alpha=\frac{\lambda}{n}$ и $R(\alpha)=0$ имеет место первый минимум диаграммы направленности.

Иначе говоря, минимум будет располагаться по направлению α при соблюдении условия $\sin\alpha=\frac{\lambda}{nd}$. Этот угол и определяет одну из границ главного максимума диаграммы направленности антенны, поэтому ширина главного максимума находится из выражения $\sin\frac{\theta}{2}=\frac{\lambda}{nd}$.

В результате интерференционных явлений антенна может иметь не только основной, но и добавочные максимумы. Последние появляются в случае, когда на каком-то направлении разность хода лучей отдельных преобразователей составляет целое число длин волн ($d \sin\alpha=\lambda$) и все колебания, создаваемые преобразователями, складываются по фазе. Чтобы этого не произошло, расстояние между преобразователями выбирают с обязательным соблюдением условия $\frac{d}{\lambda}\leqslant\frac{n-1}{n}$ или $d=\lambda\left(\frac{n-1}{n}\right)$. Нетрудно видеть, что изменяя значения d, n или λ, можно получить диаграмму направленности нужной ширины, а также изменить число и амплитуды добавочных максимумов. Причем обострение диаграммы происходит либо за счет увеличения расстояния между излучателями d или их числа n, при неизменной длине волны λ, либо, когда увеличение размеров антенны нежелательно, за счет уменьшения длины волны λ.

Мы рассматривали точечный излучатель. Фактически любой излучатель имеет вполне определенные линейные размеры. Если взять плоский излучатель со стороной, равной l, его можно представить состоящим из большого числа отдельных точечных излучателей, каждый из которых создает колебания одинаковой фазы и амплитуды. При этом оказываются справедливыми все приведенные выше рассуждения. Интерференция колебаний, создаваемых эле-

ментарными «преобразователями», приведет к формированию диаграммы направленности такого излучателя, которая определяется выражением

$$R_2(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda}\sin\alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda}\sin\alpha}.$$

Ось диаграммы направленности будет проходить через центр излучателя, перпендикулярно к его плоскости. Диаграмма будет лежать в плоскости, параллельной стороне с длиной l. Если стороны излучателя не одинаковы, направленность его будет различной для разных плоскостей. Она будет меняться в зависимости от отношения l/λ (рис. 24).

Если линейная группа состоит из n излучателей, каждый из которых имеет направленность $R_2(\alpha)$, общая направленность группы определится выражением

$$R(\alpha) = R_1(\alpha)\cdot R_2(\alpha) =$$

$$= \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda}\sin\alpha\right)}{n\cdot\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\alpha\right)}\cdot\frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda}\sin\alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda}\sin\alpha}.$$

Заметим, что все сказанное о направленности акустических антенн имеет место и при приеме. Физическая сущность происходящих при этом процессов оказывается полностью аналогичной рассмотренным здесь процессам для излучателей. В этом еще раз проявляется обратимость акустических антенн.

Итак, мы рассмотрели принципы действия электроакустических преобразователей и познакомились с некоторыми положениями теории направленности. Мы видели, что диаграмма направленности нужной формы может быть получена при определенной форме и размерах преобразователя или же при группировании преобразователей в определенном порядке. При создании антенн обычно используют оба эти принципа: группируют определенным образом

несколько преобразователей направленного или ненаправленного действия. В некоторых гидролокаторах, рыбопоисковых устройствах, эхолотах и других приборах часто используют плоские прямоугольные акустические антенны. Такие антенны, чаще всего магнитострикционные, изготавливаются из нескольких отдельных секций. Каждая из секций акустически независима от остальных и может рассматриваться как самостоятельный преобразователь. Группируя секции, можно изменять форму диаграммы направленности антенны и обеспечивать высокую точность определения направления на цель.

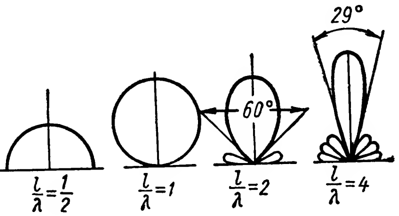


Рис. 24. Форма диаграммы направленности плоского прямоугольного преобразователя при различных отношениях l/λ

В современных корабельных гидролокаторах используются и крупногабаритные цилиндрические антенны, состоящие из большого числа преобразователей. В шумопеленгаторах, где требуется принимать очень слабые акустические сигналы, применяются сложные акустические антенны из нескольких десятков, сотен и даже тысяч преобразователей. Преобразователи в таких антеннах размещаются на корпусе корабля в виде эллипса или окружности, либо располагаются по поверхности кругового или эллиптического цилиндра, или сферы. Размер антенны может быть равен нескольким метрам, а вес ее достигать многих тонн.

В некоторых случаях для формирования диаграммы направленности, особенно в малогабаритных антеннах, могут использоваться отражатели. При этом направленность антенны будет зависеть от формы и размеров последних, сам же преобразователь может быть простым и компактным. Для того чтобы гидролокатор не терял цель в условиях корабельной качки, антенны могут стабилизироваться. С целью снижения уровня акустических помех, возникающих за счет турбулентного обтекания антенн встречными потоками воды во время движения корабля и для защиты

антенн от загрязнения и механических повреждений они всегда помещаются в металлический, резиновый или пластмассовый обтекатель гидродинамической формы.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ В ГИДРОАКУСТИКЕ

В гидроакустической аппаратуре различного назначения используются специальные методы определения координат цели — пеленга или курсового угла на цель и измерения дистанции до нее. Некоторые гидроакустические станции позволяют также определять глубину погружения обнаруженной цели. Методы определения всех этих координат существенно отличаются от методов, применяемых в других радиотехнических средствах, например в радиолокации, поэтому представляется целесообразным ознакомиться с ними несколько подробнее.

19. Формирование и поворот диаграммы направленности при определении угловых координат

Для определения направления на источник акустических сигналов используется явление направленного действия приемных акустических антенн. Определение направления сводится к совмещению оси максимума диаграммы направленности антенны с направлением на цель и взятию в момент этого совмещения отсчета по шкале пеленгов или курсовых углов. Для краткости процесс определения направления на цель в горизонтальной плоскости будем называть в дальнейшем пеленгованием. Рассмотрим последовательно, как это осуществляется в гидроакустической аппаратуре.

В предыдущей главе уже было показано, что группа точечных приемников, расположенных линейно, или плоский приемник, с достаточно большими по сравнению с длиной волны размерами, обладают направленностью. При наличии акустических антенн, построенных по такому принципу, пеленгование может осуществляться путем механического враще-

ния антенны вокруг вертикальной оси. Однако не всякая антенна может быть повернута таким путем. В некоторых случаях требуемые размеры и вес антенны могут оказаться чрезмерно большими и поворот ее связан с большими техническими трудностями. Поэтому в современной аппаратуре, в случаях, когда требуется применение больших антенн, их делают неподвижными, а при пеленговании поворачивают только искусственно сформированную диаграмму направленности. Искусственное формирование диаграммы направленности очень широко используется в гидроакустической аппаратуре и осуществляется электрическим путем за счет применения электрических задерживающих цепей.

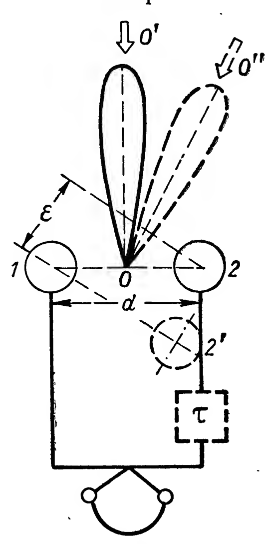


Рис. 25. Поворот диаграммы направленности за счет ввода временной задержки

Рассмотрим прежде всего саму идею искусственного формирования диаграммы направленности. Пусть пеленгование осуществляется с помощью антенны, состоящей из двух ненаправленных приемников, находящихся на удалении d один от другого (рис. 25). Оба приемника абсолютно одинаковы, и с приходом сигнала на их выходах возникают э. д. с. с равной амплитудой. Такая антенна будет обладать направленностью, и ось максимума ее диаграммы будет проходить по направлению OO'. Если источник звука находится в точке O', колебания придут к приемникам в фазе, в фазе будут и э. д. с. на выходах приемников, а амплитуда суммарного результирующего сигнала, прослушиваемого оператором, будет максимальной. Если цель переместится в точку O'', направление на нее окажется отклоненным на угол α от оси диаграммы. Фронт волны, создаваемой сигналом, придет к приемникам неодновременно. Он достигнет правого приемника раньше, чем левого. При

этом будет иметь место разность хода лучей $\varepsilon = d \cdot \sin \alpha$ и звук достигнет левого приемника позже правого на время $\tau = \varepsilon / c$. В результате такого запаздывания между колебаниями, приходящими к приемникам, возникнет сдвиг фаз $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha$. Такой же сдвиг фаз будет и у э. д. с. на выходах приемников. Из-за него громкость результирующего сигнала, прослушиваемого оператором, уменьшится, а при определенных условиях может даже стать равной нулю. Если повернуть приемники так, чтобы ось максимума диаграммы направленности совпала с новым направлением на цель, громкость сигнала вновь увеличится. Однако можно поступать иначе. Если в цепь правого приемника поместить какой-либо элемент, который задержит пришедший к приемнику сигнал на время τ, равное времени запаздывания сигнала к другому приемнику, фазы э. д. с. сигналов обоих приемников станут одинаковыми и громкость результирующего сигнала вновь станет максимальной. Таким образом, за счет введения в цепь одного из приемников задержки сигнала может быть получен эффект, равносильный повороту акустической антенны. Несмотря на то, что положение антенны не изменилось, ось максимума ее диаграммы направленности повернулась на угол α в плоскости пеленгования. Заметим, что если бы теперь сигнал вновь стал приходить с направления OO', громкость его была бы меньше, чем громкость сигнала, приходящего с направления OO''. Направление OO'' называют направлением компенсации антенны.

В качестве элементов задержки в гидроакустике обычно используют звенья фильтра нижних частот, состоящие из самоиндукции и емкости (рис. 26). Известно, что такой фильтр при пропускании через него колебаний с частотой ω вносит сдвиг фазы $\varphi = \omega \sqrt{LC}$. Так как сдвиг фазы является функцией времени и частоты, т. е. $\varphi = \omega\tau$, можно видеть, что каждое звено фильтра с параметрами L и C вносит временную задержку сигнала на величину $\tau = \sqrt{LC}$. В практике используются так называемые задерживающие цепи, состоящие из большого числа n таких отдельных звеньев. Полное время задержки такой

цепи равно $t = n \cdot \tau$, однак наличие отводов от звеньев позволяет подобрать любую необходимую задержку в пределах от 0 до t ступенями по τ каждая. К началу и концу задерживающей цепи подключаются сопротивления, равные волновому сопротивлению звена $w = \sqrt{\frac{L}{C}}$ фильтра.

Рассмотрим принцип применения задерживающей цепи для формирования диаграммы направленности акустической антенны. Возьмем группу ненаправленных акустических приемников, расположенных по окружности (рис. 27). Антенна, построенная по этому принципу, не обладает естественной направленностью. Чтобы стало возможно пеленгование, необходимо для такой антенны сформировать искусственную диаграмму направленности. Предположим, что с направления, показанного на рисунке стрелкой, поступает акустический сигнал. Фронт плоской акустической волны будет последовательно приходить на приемники антенны, начиная с самого ближнего приемника *1*, а затем сответственно на приемники *4*, *2* и *3*. Очевидно, эти колебания будут иметь разности хода лучей, а соответственно им и сдвиги фаз. Суммарный сигнал, полученный в результате сложения э. д. с. с выходов приемников, будет слабым и не даст представления о направлении прихода сигнала. Если теперь к выходам приемников подключить задерживающую цепь, так, чтобы ее участки вносили временную задержку, соответствующую разнице во времени достижения сигналом каждого приемника, то сигналы на выходах приемников окажутся приведенными к одному моменту времени — к моменту, когда фронт достигнет самого дальнего из них, в нашем случае приемника *3*.

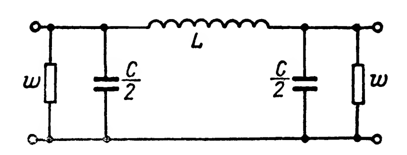


Рис. 26. Фильтр нижних частот — звено электрической задерживающей цепи

За счет введения временной задержки приемники, фактически расположенные по окружности, оказались как бы перенесенными на одну линию, параллельную

фронту приходящей волны и проходящую через самый дальний от источника приемник. Круговая антенна оказалась замененной эквивалентной ей линейной антенной с приемниками, показанными на рисунке пунктиром. А мы уже видели ранее, что такая антенна обладает направленностью действия. Ось максимума ее диаграммы направленности оказывается повернутой в сторону источника сигнала. Э. д. с., создаваемые приемниками, будут суммироваться на задерживающей цепи в фазе. Громкость слышимого сигнала окажется максимальной. Нетрудно представить, что, переключая отводы звеньев задерживающей цепи по иному, но с соблюдением рассмотренной последовательности, можно сформировать эквивалентную линейную антенну, расположенную по другому направлению, и вместе с ней повернуть на новое направление и ось максимума диаграммы направленности.

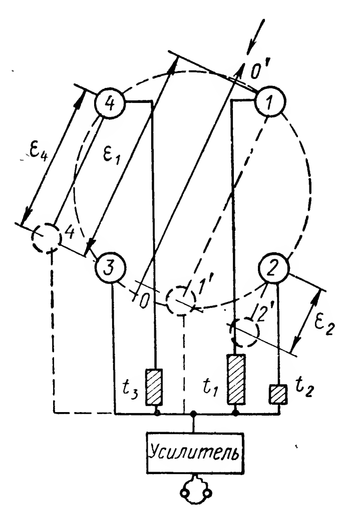


Рис. 27. Формирование диаграммы направленности для группы приемников, расположенных по окружности

Для того чтобы сформировать диаграмму направленности для круговой антенны диаметром D, необходимо иметь цепь с общим временем задержки, равным $t=D/c$. Число звеньев цепи должно быть не меньше числа приемников. С увеличением числа звеньев растет число возможных положений эквивалентной линейной антенны, а следовательно, и число положений оси максимума диаграммы направленности, поэтому с увеличением числа звеньев задержки поворот диаграммы направленности в плоскости пеленгования может быть сделан более плавным.

В гидроакустической аппаратуре для формирования и вращения диаграммы направленности неподвижной антенны используется устройство, называе-

мое электрическим компенсатором. С его помощью оператор может подключать звенья цепи задержки

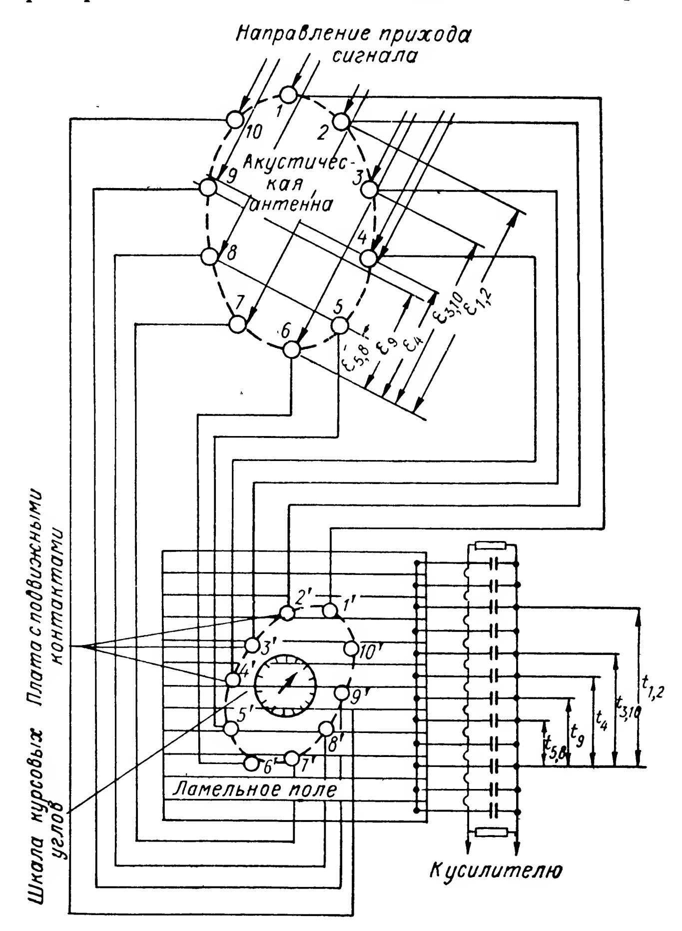


Рис. 28. Принцип устройства и действия электрического компенсатора

к приемникам в строго определенной последовательности и брать отсчет направления на источник акустических сигналов. Простейший компенсатор устроен и работает следующим образом (рис. 28). Выводы от звеньев задерживающей цепочки подключаются

к изолированным друг от друга ламелям, образующим ламельное поле. По этому полю скользят контакты, соединенные с приемниками и расположенные на специальной плите так, что каждый из них в соответствующем масштабе точно отображает положение одного из приемников, входящих в состав акустической антенны. Плата с контактами может свободно вращаться вокруг оси, при этом контакты будут скользить по ламелям и подключать к каждому приемнику строго определенное число звеньев задерживающей цепи. На оси платы помещается стрелка. В процессе пеленгования оператор разворачивает плату до тех пор, пока громкость звука не станет максимальной. В этот момент он берет отсчет по положению стрелки на шкале курсовых углов или пеленгов.

20. Методы акустического пеленгования

Итак, мы рассмотрели способ поворота диаграммы направленности акустической антенны в плоскости пеленгования. Важной задачей является точное определение положения оси максимума диаграммы направленности, совпадающего с направлением на цель, при котором и берется отсчет угловой координаты, т. е. производится само пеленгование. В гидроакустике широко используется несколько различных методов пеленгования.

Простейшим и первым по времени использования в гидроакустике явился *биноуральный метод,* основанный на возможности человеческого слуха замечать неодновременность прихода акустического сигнала к правому и левому уху. Человек без труда определяет направление источника звука, поворачивая голову. Ухо реагирует на разность времени прихода сигнала, примерно равную 0,00003 *сек* и соответствующую отклонению от среднего направления около 3°. Этим и определяется максимальная ошибка метода. Отклонению источника на 90° соответствует разность времени прихода сигнала к ушам 0,00063 *сек.* Если поместить в воде два акустических приемника на расстоянии 95 *см*, т. е. на расстоянии, которое звук в воде проходит за 0,00063 *сек,* и сигнал каждого приемника

прослушивать соответствующим ухом оператора, поворачивая их, можно определить направление на источник звука. В качестве приемников могут быть взяты резиновые груши, соединенные трубкой с ушами. Биноуральный метод в аппаратуре в настоящее время не используется.

При *максимальном методе* акустического пеленгования наблюдают за изменением напряжения сигнала на выходе направленной акустической антенны

$$U(\alpha) = U_{max} \cdot R(\alpha),$$

где $R(\alpha)$ — характеристика направленности антенны; U_{max} — максимальное значение напряжения, получаемого на выходе антенны.

Очевидно, что величина достигает своего максимального значения $R(\alpha) = 1$, т. е. в момент, когда $\alpha = 0$ и направление на цель совпадает с осью максимума диаграммы направленности. Во всех остальных случаях величина сигнала будет меньшей. Регистрация максимального сигнала производится либо на слух, либо по яркости свечения на экране электроннолучевой трубки.

Максимальный метод пеленгования прост по своей технической реализации, однако он недостаточно точен. Причина этого заключается в субъективной оценке громкости или яркости оператором. Существует угол чувствительности $\Delta\alpha$, в пределах которого оператор не может обнаружить изменения громкости. За счет этого появляется и ошибка, максимальная величина которой оказывается равной углу чувствительности и может быть весьма значительной по абсолютной величине. Поэтому метод в ряде случаев не удовлетворяет современным требованиям к точности пеленгования.

Более высокую точность обеспечивают так называемые фазометрические методы пеленгования, к которым относятся фазовый и фазово-амплитудный методы.

При *фазовом методе* производится сравнение фаз колебаний, поступающих на два приемника или на две группы приемников, входящих в состав акустической антенны. При точном повороте антенны на цель фазы колебаний на приемниках будут одинаковыми,

при неточном — будет иметь место разность фаз. Определяется это оператором по характеру изображения сигнала на экране электроннолучевой трубки. Поясним сущность метода (рис. 29). Пусть имеются два приемника, или две группы приемников одинаковой чувствительности, расположенные относительно направления прихода фронта акустической волны так, что получается разность хода лучей ε и соответствующий ей сдвиг фаз φ.

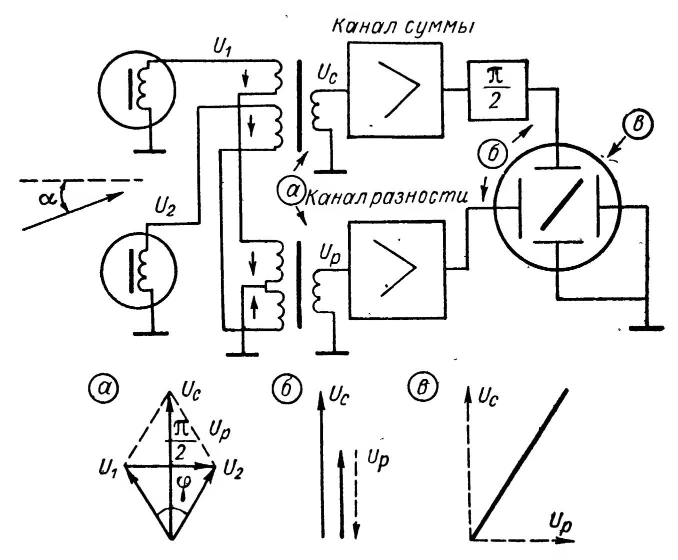


Рис. 29. Фазовый метод акустического пеленгования

Тогда на выходах приемников возникнут э. д. с.

$$e_1 = E_{max} \cdot R(\alpha) \cdot \sin \omega t;$$

$$e_2 = E_{max} \cdot R(\alpha) \cdot \sin(\omega t - \varphi),$$

где E_{max} — амплитудное значение э. д. с., развиваемых приемниками. Эти э. д. с. подаются во входные цепи приемно-усилительного тракта — на специальные трансформаторы суммы и разности. Во вторичных обмотках этих трансформаторов происходит соответственно сложение и вычитание двух напряжений одинаковой амплитуды, но разной фазы, появляются напряжения суммы и разности. Эти напряжения, как

можно видеть из векторной диаграммы, всегда имеют сдвиг фазы, равный 90°, независимо от сдвига фаз колебаний на входе трансформаторов. Амплитуды напряжений будут меняться. Так, при сдвиге фаз на входе $\varphi=0°$ вектор разности будет равным нулю, а вектор суммы станет максимальным и равным $2U$. Во всех остальных случаях будут иметь место и напряжения суммы, и напряжения разности. Следовательно, точному направлению оси диаграммы направленности антенны на цель соответствует отсутствие напряжения разности. Если напряжения суммы и разности подать на двухканальный усилитель, а к выходу усилителя подключить электроннолучевую трубку с электростатическим отклонением, на экране трубки появится изображение в виде наклонного эллипса. При повороте антенны относительно направления на цель размеры осей эллипса и углы их наклона будут меняться. Наблюдение за такой фигурой и практическое использование изображения для пеленгования оказывается затруднительным. Поэтому, для упрощения и улучшения наглядности изображения, в один из каналов усилителя вводят ячейку, вносящую сдвиг фазы в сигнал, равный 90°. Благодаря этому сдвиг фаз между напряжениями суммы и разности становится равным уже не 90°, как это было на входе усилителя, а 0° или 180°. Если эти напряжения подать на отклоняющие пластины трубки, на ее экране появится изображение в виде линии. В общем случае, при наличии сдвига фаз, а следовательно, и напряжения в канале разности, линия будет наклонена относительно вертикали. При отсутствии сдвига фаз линия займет строго вертикальное положение, по которому и можно судить о точном совпадении оси диаграммы направленности антенны с направлением на цель.

При наличии сдвига фаз φ угол отклонения светящейся линии на экране от вертикали оказывается равным β, причем $\beta=\frac{\varphi}{2}=\frac{\pi d}{\lambda}\sin\alpha$. Как можно видеть из этого выражения, точность пеленгования может быть повышена за счет увеличения расстояния между приемниками d и пеленгования на более высокой частоте, когда уменьшается длина волны λ. Очевидно, ошибка, пеленгования будет зависеть от

способности оператора обнаружить отклонение β светящейся линии от вертикали. Заметим, что угол отклонения линии β всегда больше угла отклонения α оси диаграммы направленности от направления на цель. Даже очень незначительному углу α соответствует заметное на глаз отклонение β.

При отклонении линии от вертикального направления верхний ее конец показывает оператору, куда отклонена ось диаграммы направленности антенны относительно направления на цель и в какую сторону

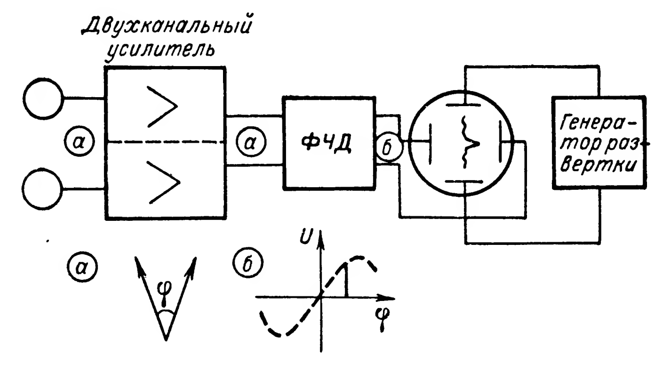


Рис. 30. Фазово-амплитудный метод акустического пеленгования (при гидролокации)

ее надо повернуть, чтобы взять пеленг. Наблюдая за экраном электронного индикатора, называемого указателем отклонения пеленга (УОП), оператор так поворачивать ось диаграммы направленности, чтобы изображение сигнала представляло собой строго вертикальную линию, в этот момент и берется отсчет пеленга.

Нсколько иначе осуществляется пеленгование *фазово-амплитудным методом.* В этом случае колебания, поступающие на две группы приемников, составляющих акустическую антенну, поступают на усилитель имеющий два одинаковых канала. К выходу усилителя подключается фазовый детектор (рис. 30). Как известно, напряжение на выходе этого устройства является функцией разности фаз напряжений на его входе. Если акустическая антенна повернута точно на цель, э. д. с. на выходе приемников, а следова-

тельно, и сигнал на входе фазового детектора будут иметь одинаковые амплитуды и фазы. Напряжение на выходе фазового детектора при этом равно нулю. В случае, когда ось максимума диаграммы направленности антенны не совпадает с направлением, сигналы на входе детектора будут иметь одинаковые амплитуды, но разные фазы. На выходе детектора появится напряжение постоянного тока, амплитуда которого пропорциональна разности фаз, а знак зависит от знака сдвига фаз, или, иначе говоря, от стороны отклонения оси диаграммы от направления на цель. Если напряжение с выхода фазового детектора подать на отклоняющую систему электроннолучевой трубки, луч отклонится от центра трубки в ту же сторону, что и антенна от направления на цель. Поворачивая антенну, оператор добивается такого положения, когда при приходе сигнала луч сохраняет свое положение в центре трубки. Тогда и берется отсчет пеленга на цель. Фазово-амплитудный метод пеленгования очень удобен для использования в системах автоматического сопровождения цели по пеленгу, в которых сигнал с выхода фазового детектора управляет следящей системой.

Рассмотренные методы могут использоваться и при определении углов в вертикальной плоскости —углов места цели. Однако при этом возникают значительные трудности, связанные со спецификой распространения акустических волн в море. Так, рефракция акустических лучей приводит к появлению больших ошибок в определяемых углах, а отражения акустической энергии от поверхности моря вызывает появление многочисленных ложных эхосигналов и затрудняет выделение полезного сигнала на их фоне.

21. Методы измерения дальности

Измерения дальности до цели производятся в гидроакустике, главным образом, активными средствами, основанными на принципах гидролокации. Существуют, правда, и методы измерения дальности без излучения акустической энергии, но здесь они рассматриваться не будут.

При измерении дальности активными средствами производят излучение акустической энергии в сто-

рону цели. Часть энергии в момент, когда излученный сигнал достигнет цели, отразится от нее и возвратится в точку излучения в виде эха. Измерение дальности основано на определение промежутка времени между моментами излучения посылки и прихода эха и может быть осуществлено при импульсном и при непрерывном излучении акустической энергии. Сам способ определения дальности в каждом из этих случаев будет различным.

Наиболее распространено измерение дальности при импульсном излучении сигналов. В этом случае происходит модуляция сигнала по амплитуде, и акустическая энергия излучается в виде одиночных кратковременных импульсов — посылок длительностью от нескольких единиц до нескольких десятков миллисекунд. Интервал между последовательными посылками $t_з$ выбирается таким, чтобы за его длительность посылка успела пройти путь, равный максимальной дальности действия аппаратуры R_{max}, и вернуться в точку излучения в виде эха:

$$t_з = \frac{2R_{max}}{c},$$

здесь c — скорость звука. Очевидно, зная скорость звука и время, прошедшее между посылкой и приходом эха, нетрудно определить расстояние до цели

$$R = \frac{c \cdot t_з}{2}.$$

Хотя импульсный метод измерения дальности в гидроакустике совершенно аналогичен радиолокационному, работа импульсного гидролокатора существенно отличается от работы аналогичного радиолокатора. В радиолокации принимаемые импульсы поступают практически непрерывно. В гидролокации принимаются одиночные импульсы, следующие с большими интервалами. Причиной этого является малая скорость звука в воде. Для того чтобы определить интервал между посылками гидролокатора, можно воспользоваться приближенной формулой: $t_з = 0,25\ R$, где R — расстояние до цели, в кабельтовых*.

* Кабельтов — единица измерения расстояния на море. 1 *каб.* = 0,1 морской мили = 185 *м.*

Так, при расстоянии до цели 100 *каб* (18,5 *км*) интервал между посылками гидролокатора составит 25 *сек.* В аналогичных условиях в радиолокации он составил бы лишь ничтожные доли секунды. Большой интервал между посылками приводит к значительным затратам времени на обзор водного пространства при поиске цели и на определение ее координат. Одиночные эхосигналы, приходящие в приемный тракт гидролокатора с большими интервалами, затрудняют применение статистических методов выделения сигналов на фоне помех. За время, прошедшее с момента возникновения эха до момента его регистрации гидролокатором, цель успевает изменить свое местоположение. Все эти особенности обязательно следует учитывать, рассматривая работу гидролокатора.

Как и в радиолокации, разрешающая способность по дальности ΔR импульсного гидролокатора определяется выражением: $\Delta R = c\tau/2$. Однако из-за малой скорости звука c и больших по сравнению с радиолокационными длительностей посылок τ разрешающая способность импульсных гидролокаторов оказывается невысокой. Регистрация дальности при импульсном методе измерения может осуществляться с применением электроннолучевых или электромеханических индикаторов. Электроннолучевые индикаторы обычно являются индикаторами типа «А», имеющими линейную развертку луча. Запуск развертки происходит в момент излучения посылки. Скорость развертки пропорциональна скорости распространения звука. В момент прихода эхосигнала на экране возникает амплитудная отметка и увеличивается яркость свечения луча. Отстояние отметки от начала развертки определяет дистанцию до цели. Обычно в гидролокаторах на индикаторах совмещают регистрацию дистанции с определением положения оси диаграммы направленности относительно направления на цель. Наблюдая за изображением, оператор в случае необходимости может подкорректировать положение антенны по направлению.

Электромеханические регистраторы дистанции, часто называемые рекордерами, широко применяются в гидролокационной аппаратуре. В таких регистраторах документальная запись измеренных

расстояний производится на электрохимическую бумагу. Регистратор дистанции устроен и работает следующим образом (рис. 31). Лентопротяжный механизм протягивает бумажную ленту со строго постоянной скоростью сверху вниз. Поперек бумаги со скоростью, пропорциональной скорости звука, перемещается металлическое перо. Начало движе-

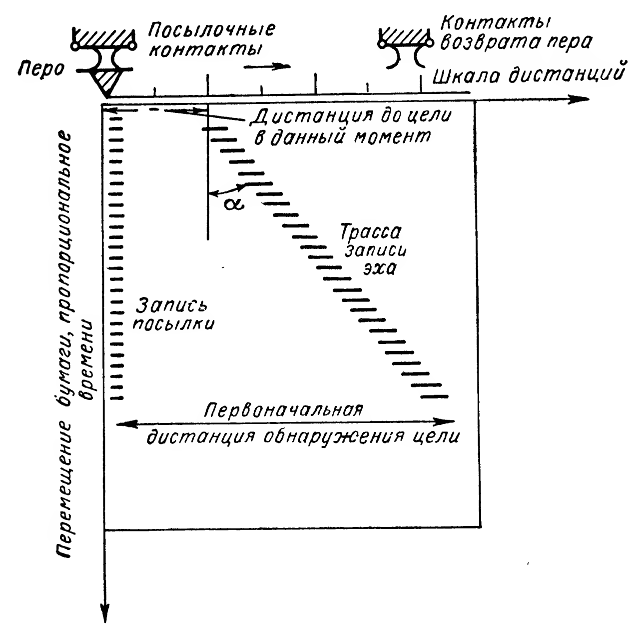


Рис. 31. Принцип действия и устройства электромеханического регистратора дистанции (рекордера)

ния пера совпадает с моментом излучения посылки. В момент прихода эхосигнала через перо и бумагу протекает ток, оставляя на бумаге яркий, хорошо заметный след. Отстояние этого следа от точки начала движения пера и определяет дистанцию до цели. При движении перо замыкает специальные контакты, управляя запуском очередной посылки и определяя конец цикла движения. Когда перо

дойдет до конца бумажной ленты, оно скачком возвратится в исходную точку. Вновь производится посылка, и перо начинает движение. Эти циклы непрерывно повторяются. Если дистанция измеряется с каждой посылкой, отметки, записанные на бумаге, образуют так называемую трассу эха. По наклону трассы, характеру ее изменения и особенностям записи эхосигналов оператор получает ценную дополнительную информацию о цели, характере ее маневрирования и т. п. При импульсном методе изме-

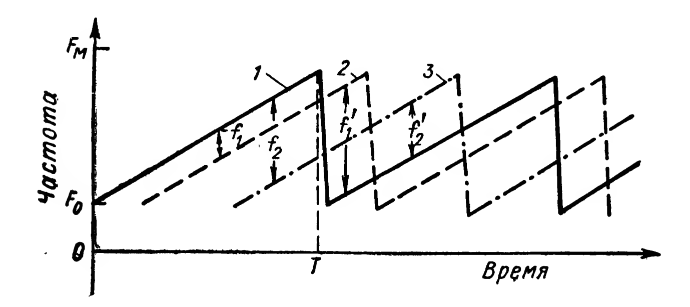


Рис. 32. Измерение дальности при непрерывном излучении и частотной модуляции сигнала

1 — излучаемый сигнал; *2, 3* — эхосигналы

рения дистанции могут использоваться и другие индикаторы.

За последние годы в гидроакустике все более широко стал применяться метод измерения дальности при непрерывном излучении и частотной модуляции сигнала. В этом случае гидролокатор излучает колебания, частота которых меняется по пилообразному закону (рис. 32). Достигнув цели, эти колебания возвращаются в точку излучения—приема в виде эхосигнала, частота которого будет отличаться от частоты, излучаемой в момент приема эха, на некоторую величину Δf_R. Эта величина будет зависеть от дистанции до цели, возрастая с увеличением дистанции. Параметры модуляции частоты излучаемого сигнала выбирают так, чтобы за период модуляции звук успел пройти расстояние, равное

или большее максимальной дальности действия гидролокатора. За это время частота излучаемых колебаний изменится на величину ΔF, которая является девиацией частоты.

Если при измерении дистанции до цели определена разность между мгновеннными значениями излучаемой и принимаемой частот, равная Δf_R, дистанция до цели может быть найдена следующим образом: $R = R_{max} \cdot \frac{\Delta f_R}{\Delta F}$. С изменением дистанции до цели будет меняться и разностная частота: при увеличении дистанции она будет возрастать, при уменьшении — уменьшаться. Эта простая зависимость делает метод пригодным для использования в малогабаритных устройствах, например в гидролокаторах для водолазов. Наблюдая за изменением высоты звучания, водолаз может ориентироваться при перемещениях относительно интересующего его подводного объекта. При этом не требуется применения сложных индикаторов. Можно ожидать, что метод найдет применение и в любительских конструкциях.

В более сложной корабельной аппаратуре для измерения дистанции используют набор полосовых фильтров. Каждый фильтр пропускает разностную частоту, соответствующую определенной дистанции. С помощью электронного коммутатора производится поочередный опрос выходов всех фильтров. По тому, через какой фильтр проходит сигнал, определяют дистанцию до цели. Индикатором сигнала могут служить лампочки, зажигаемые пороговыми устройствами, включенными в цепи фильтров. В некоторых случаях одновременно с переключением выходов фильтров осуществляется развертка луча на экране электроннолучевой трубки. Начинается она в момент опроса фильтра, соответствующего минимальной дистанции, а заканчивается после опроса последнего фильтра. Если во время опроса фильтров примут сигнал, положение его отметки на линии развертки будет соответствовать дистанции до цели. Точность измерения дистанции определяется числом используемых фильтров. Так, уже при 50-ти фильтрах максимальная ошибка в измеряемой дистанции не будет превышать 1% от шкалы.

ГЛАВА ПЯТАЯ

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Теоретические положения, рассмотренные в предыдущих главах, легли в основу создания разнообразных гидроакустических средств.

Такие средства широко используются для наблюдения и связи под водой, обеспечения безопасности кораблевождения, поиска рыбы и морских животных, различных морских биологических исследований, изучения состава грунта морского дна и разведки полезных ископаемых и во многих других случаях. Гидроакустическая техника все шире внедряется в подводный спорт и охоту, в водомоторный спорт. Уже существуют любительские гидроакустические конструкции. Рассмотрим, как устроены и работают основные современные гидроакустические средства.

22. Дальность действия гидроакустических средств

Чтобы уяснить некоторые особенности устройства и работы гидроакустической аппаратуры, познакомимся с основными факторами, определяющими дальность ее действия. Ранее уже говорилось, что акустические сигналы всегда принимаются на фоне интенсивных реверберационных и шумовых помех различного происхождения.

Для выделения сигнала на фоне помехи необходимо, чтобы между их интенсивностями $I_с$ и $I_п$ было соблюдено соотношение

$$I_с \geqslant \delta^2 I_п, \qquad (1)$$

где δ — так называемый пороговый коэффициент.

Для гидролокации

$$\delta \approx \frac{\sqrt{2}\,k_\delta}{\sqrt{\Delta f T}}, \qquad (2)$$

где k_δ — коэффициент распознавания, характеризующий то необходимое отношение напряжения сигнала к напряжению помехи на входе индикатора, которое обеспечивает прием сигнала с заданной вероятностью; Δf — полоса пропускания приемного тракта; T — время усреднения сигнала.

Интенсивность сигнала при гидролокации может быть представлена формулой

$$I_с = \frac{w_а \cdot \gamma_и R_э^2 A^2}{16\pi R^4} 10^{-0,2\beta R}, \qquad (3)$$

где $w_а$ — излучаемая акустическая мощность; $\gamma_и$ — коэффициент концентрации при излучении; $R_э$ — эффективный (эквивалентный) радиус цели — условная величина, характеризующая отражающие свойства цели; A — фактор аномалии — коэффициент, характеризующий влияние рефракции на интенсивность сигнала; β — коэффициент пространственного затухания сигнала; $\frac{1}{16\pi R^4}$ — величина, характеризующая расширение фронта волны с расстоянием (при прямом и обратном распространении сигнала); R — дистанция до цели.

Интенсивность шумовой помехи определяется формулой

$$I_п = \frac{a_п \Delta f_{(гц)}}{f^2_{(кгц)} \gamma_п}, \qquad (4)$$

где $a_п$ — некоторый размерный коэффициент, показывающий зависимость интенсивности помех от частоты; f — рабочая частота гидролокатора; Δf — ширина полосы пропускания приемного тракта, определяемая с учетом влияния эффекта Доплера; $\gamma_п$ — коэффициент концентрации при приеме. Подставив в формулу (1) значения выражений (2), (3) и (4), можно получить уравнение дальности действия гидролокатора.

Все факторы, определяющие дальность действия гидролокатора, можно разделить на несколько основных групп. Большую группу составляют параметры гидроакустической аппаратуры: излучаемая акустическая мощность $w_а$, коэффициенты концентрации $\gamma_и$ и $\gamma_п$, рабочая частота f, полоса пропускания Δf, время осреднения T, коэффициент распознавания k_δ. Сюда же можно отнести уровень собственных помех. В отдельную группу можно свести факторы, характеризующие состояние водной среды, в которой распространяются акустические сигналы: коэффициент пространственного затухания β, фактор аномалии A, уровень акустических помех — реверберационных и

шумов моря. Наконец, важную роль играют факторы, характеризующие акустические свойства цели. В данном случае сюда относится эффективный (эквивалентный) радиус цели $R_э$. Этот радиус является условной величиной и обозначает размеры воображаемой сферы, интенсивность эхосигнала от которой равна интенсивности эхосигнала от реальной цели любой конфигурации.

Понятие об оптимальной частоте. Все факторы, определяющие дальность действия гидролокатора,

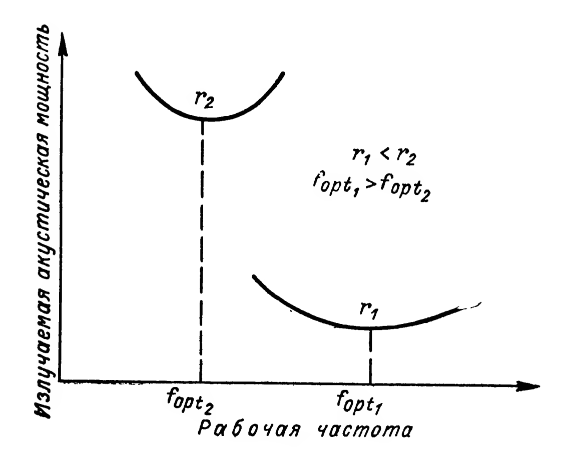


Рис. 33. Зависимость между частотой и излучаемой мощностью при неизменных параметрах гидролокатора, иллюстрирующая понятие оптимальной частоты

в той или иной степени зависят от частоты, причем некоторые (например, $\gamma_и$, $\gamma_п$) с увеличением частоты способствуют увеличению дальности, а другие (например β) — ее уменьшению. Это противоречивое влияние различных факторов на дальность приводит к тому, что для определенной дальности действия существует своя, так называемая оптимальная, частота. Оптимальная частота обеспечивает получение требуемой дальности действия R при минимальной излучаемой мощности и прочих постоянных параметрах гидролокатора (рис. 33). Определяется она путем постановки в формулу дальности всех входящих в нее

величин в форме, выражающей зависимость их от частоты, и исследованием полученной функции на максимум и минимум.

Для гидролокации:

$$f_{\text{опт. } (кгц)} = \frac{39}{R^{2/3}_{(км)}}.$$

Как видно из формулы, чем больше требуемая дальность действия R, тем ниже оптимальная частота. Заметим, что зависимость между параметрами, определяющими дальность действия, и частотами в некоторых конкретных случаях может быть различной. Соответственно будет меняться и численный коэффициент в формуле оптимальной частоты. Однако общий характер зависимости расстояния от частоты сохранится.

Понятие оптимальной частоты остается справедливым и для других гидроакустических устройств. Так, для приборов звукоподводной связи:

$$f_{\text{опт. } (кгц)} = \frac{62}{R^{2/3}_{(км)}}.$$

23. Гидролокаторы

Гидролокаторами называют гидроакустические устройства, позволяющие производить поиск подводных целей и определять их координаты активным методом, т. е. с излучением акустической энергии в виде импульсов (посылок). Если на пути этих посылок оказывается какой-либо объект, хорошо отражающий акустические волны, например, подводная лодка, скала, айсберг, крупное морское животное, скопление рыбы, а иногда даже и отдельная рыба, отраженная от этого объекта часть энергии возвращается в приемный тракт гидролокатора в виде эхосигнала. Гидролокатор позволяет определять направление прихода эхосигнала, т. е. пеленг на цель, а по интервалу между излучением посылки и приходом эха — дистанцию до нее. Некоторые гидролокаторы позволяют определить и глубину цели.

Принцип гидролокации широко применяется в аппаратуре самого различного назначения, поэтому гидролокатором обычно называют устройство, пред-

назначенное для решения широкого круга задач, связанных с наблюдением за подводными объектами. Специализированные гидролокаторы, т. е. устройства, предназначенные для решения конкретных задач, как правило, имеют название, показывающее их назначение: это эхолоты, рыболокаторы, эхоледомеры и эхоайсбергомеры и некоторые другие приборы. Специфика решаемой задачи отражается на особенностях конструкции и параметрах такой аппаратуры.

Гидролокаторы различаются по своей конструкции, техническим параметрам, числу определяемых координат цели и по другим признакам. Наиболее существенными из этих различий является способ обзора окружающего подводного пространства. По этому признаку современные гидролокаторы можно разделить на две основные разновидности: на гидролокаторы шагового и кругового обзора пространства.

Гидролокаторы шагового обзора имеют сравнительно узкую диаграмму направленности акустической антенны. Каждой посылкой облучается некоторый сектор, затем аппаратура переключается в приемный режим и направление оси диаграммы направленности остается неизменным в течение времени $t_з$, необходимого для того, чтобы посылка прошла путь, равный максимальной дальности действия гидролокатора, и возвратилась в виде эхосигнала. Напомним, что $t_з = 2R_{max}/c$.

Если по истечении этого времени эхосигнал не получен, поворачивают антенну на новое направление и повторяют весь цикл. Происходит последовательный обзор пространства в заданной плоскости. Угол между смежными последовательными положениями антенны называют *шагом поиска*. Он выбирается из условия надежного, без пропусков, перекрытия просматриваемого сектора. Обычно величина шага поиска составляет 5—10°. Если надо обследовать сектор Ω при шаге поиска Δ и интервале между посылками $t_з$, приходится затрачивать довольно много времени. Это время называется временем обзора и определяется выражением

$$T_о = \frac{\Omega}{\Delta} \cdot t_з = \frac{2\Omega \cdot R_{max}}{\Delta \cdot c}.$$

Большое время обзора, а также и то, что гидролокатор обеспечивает получение текущей информации о подводной обстановке только в пределах узкого сектора, определяемого шириной диаграммы направленности, является серьезным недостатком гидролокаторов шагового обзора. Однако эти гидролокаторы имеют и весьма существенное достоинство, особенно важное для малогабаритной и любительской аппаратуры: при последовательном обзоре пространства требуется сравнительно небольшая излучаемая мощность.

От отмеченных недостатков свободны гидролокаторы кругового обзора, получившие широкое распространение после минувшей войны. В них происходит всенаправленное излучение акустической энергии, т. е. одной посылкой облучается весь водный горизонт. После излучения посылки гидролокатор переводится в приемный режим, формируется сравнительно острая характеристика направленности, быстро вращающаяся в плоскости обзора. В случае возникновения эхосигнала или даже нескольких эхосигналов от целей, находящихся в разных направлениях и на разных расстояниях, определяются координаты всех этих целей. Весь цикл обзора водного горизонта оказывается равным интервалу между двумя последовательными посылками, т. е. сокращается в десятки раз по сравнению с шаговым обзором. Гидролокатор обеспечивает получение информации сразу из всего окружающего пространства.

Рассмотрим более подробно устройство основных разновидностей современных гидролокаторов.

Гидролокатор шагового обзора. Работу и устройство импульсного гидролокатора шагового обзора удобно рассмотреть по обобщенной блок-схеме (рис. 34). Вполне понятно, что тот или иной конкретный образец гидролокатора может иметь или не иметь каких-либо элементов, показанных на обобщенной схеме, но общий принцип построения и устройства аппаратуры, как правило, сохраняется.

Рассмотрим особенности основных элементов гидролокатора.

Акустическая антенна, обычно плоская и небольшая по размерам, обладает сравнительно острой

диаграммой направленности, образующейся за счет соотношений между размерами антенны и длиной волны акустических колебаний. Антенна помещена в обтекатель из звукопрозрачного материала: стали, армированной резины или стеклопластика. Он защищает антенну от встречного потока воды, возникающего во время движения корабля, и уменьшает уровень возникающих при этом гидродинамических по-

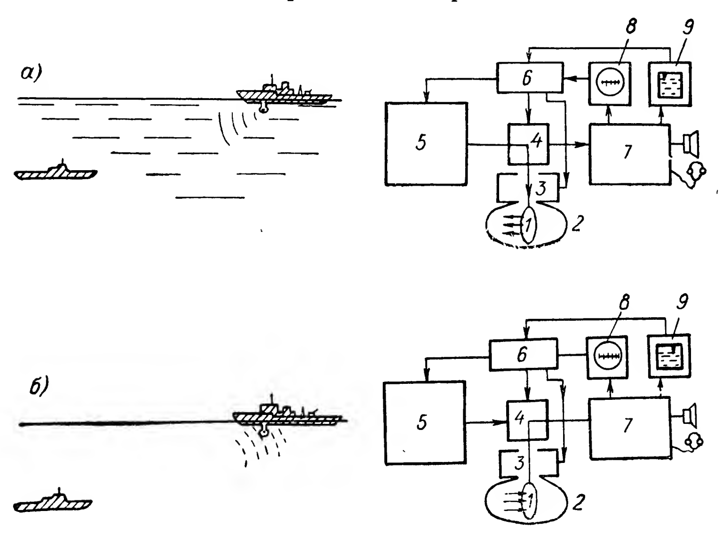


Рис. 34. Блок-схема импульсного гидролокатора шагового обзора· *а* — излучение посылки; *б* — прием эхосигнала

1 — акустическая антенна; *2* — обтекатель; *3* — подъемно-поворотное устройство; *4* — коммутационное устройство; *5* — генератор; *6* — пульт управления; *7* — усилитель; *8* — электронный индикатор; *9* — рекордер

мех. Антенна и обтекатель механически связаны с подъемно-поворотным устройством, которое обеспечивает разворот антенны при поиске и пеленговании целей и позволяет на время, когда гидролокатор не используется, убирать антенну вместе с обтекателем внутрь корпуса корабля.

Коммутационное устройство, обычно бесконтактное, обеспечивает переключение антенны с излучения на прием и обратно. Генератор электрических колебаний вырабатывает при излучении мощные импульсы необходимой частоты, длительности и формы. В при-

емно-усилительном тракте происходит усиление и преобразование слабых сигналов перед подачей их на индикаторные устройства: телефоны и динамик, электромеханический регистратор дистанции (рекордер) и электронный указатель отклонения пеленга. Работа этих индикаторов была рассмотрена ранее.

Различные элементы, обеспечивающие синхронизацию работы блоков аппаратуры, дистанционное управление подъемом, опусканием и поворотом антенны, контроль за исправностью блоков и за параметрами излучаемых сигналов и т. п. размещаются в пульте управления станцией.

Как можно видеть из схемы, большинство элементов гидролокатора является радиотехническими устройствами. Генератор, усилители, электронный индикатор строятся по общим принципам, присущим аналогичной аппаратуре любого назначения. Однако они имеют и существенные отличия, связанные с используемыми частотами, длительностями посылок, скоростью развертки и т. п. Сугубо специфическими элементами являются акустическая антенна с обтекателем, коммутационное устройство и электромеханический регистратор дистанции, не применяемые в других областях радиотехники.

Любительский гидролокатор для аквалангистов. Относительная простота устройства гидролокатора шагового обзора привлекла к себе внимание любителей. Конструкция простого и малогабаритного гидролокатора для подводных пловцов была разработана и осуществлена в 1965 г. любителями В. Ильичевым и М. Свиньиным. Можно предполагать, что сочетающий в себе простоту и высокий, по существу профессиональный, уровень инженерного и конструктивного решения гидролокатор привлечет к себе внимание и других радиолюбителей. Поэтому представляется целесообразным кратко ознакомить читателей с устройством и конструкцией гидролокатора, считая, что тот, кого он заинтересует, обратится к обстоятельному и квалифицированному описанию аппаратуры, составленному ее авторами*. Сам по себе

* В. Ильичев, М. Свиньин. Гидролокатор для аквалангистов. В сб. «Спортсмен-подводник». Вып. 18. Изд. ДОСААФ, М, 1968, стр. 50—66.

факт появления любительской гидроакустической аппаратуры свидетельствует о том, что перед квалифицированными радиолюбителями открывается новая и интересная область применения своих способностей. Хочется надеяться на то, что с развитием водномоторного и подводного спорта в стране будет расширяться и любительское изготовление гидроакустической аппаратуры различного назначения.

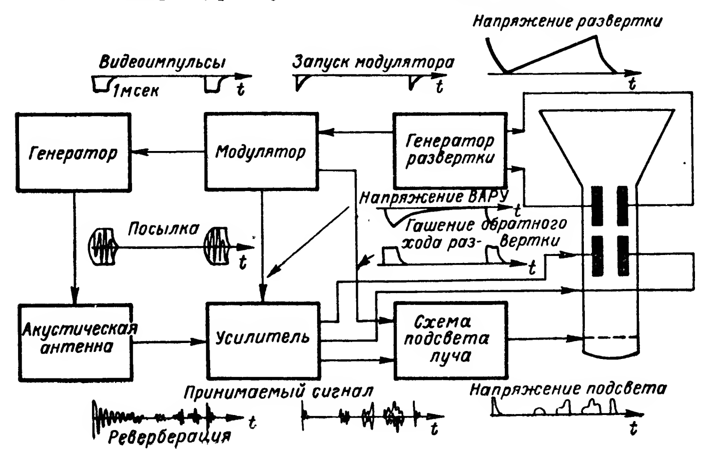


Рис. 35. Блок-схема любительского гидролокатора

Схема, конструкция и основные технические параметры сигналов гидролокатора выбраны с учетом его назначения — обеспечения подводного наблюдения для спортсменов-аквалангистов. Надо было создать простой и дешевый, малогабаритный, легкий прибор, пригодный для изготовления в любительских условиях. В то же время он должен был обеспечивать обнаружение подводных препятствий на расстоянии нескольких десятков метров, определение направления на обнаруженную цель и дистанции до нее. Авторы выбрали импульсный гидролокатор с максимальным методом пеленгования и регистрацией сигнала на экране электролучевой трубки, которая служит также для определения направления и дистанции до цели. От прослушивания сигналов авторы отказались, по-видимому, из-за отсутствия гермети-

ческих телефонов с костной проводимостью, необходимых в этом случае. На рис. 35 показана блок-схема гидролокатора.

В гидролокаторе использована акустическая антенна, выполненная из круглой пластины титаната бария толщиной 8 *мм* и диаметром 120 *мм* (рис. 36). Обе плоскости пластины посеребрены и являются обкладками колебательной системы. Пластина помещена в герметичный корпус из алюминия, передняя стенка которого является мембраной. Неизлучающая, обращенная внутрь корпуса гидролокатора плоскость пластины преобразователя заэкранирована пенопластом. Корпус преобразователя заполняется конденсаторным маслом, обеспечивающим электрическую изоляцию обкладок и создающим акустическую нагрузку пластины, примерно равную нагрузке воды.

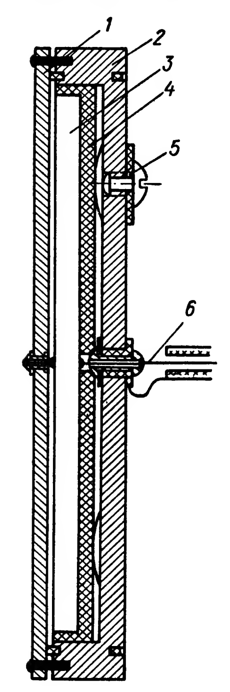


Рис. 36. Конструкция акустической антенны любительского гидролокатора

1 — мембрана; *2* — корпус; *3* — пластинка из титаната бария; *4* — экран из пенопласта; *5* — винт-пробка; *6* — вывод

Антенна имеет острую диаграмму направленности — порядка 3°. При малых размерах антенны такую диаграмму можно было получить лишь при использовании очень высоких частот. Поэтому рабочая частота была взята равной 304 *кгц*, что во много раз превышает частоты, используемые в корабельных гидролокаторах. Эта частота явилась также резонансной для используемой пластины преобразователя. Сильное затухание акустической энергии, возникающее на столь высокой частоте, в данном случае из-за небольшой требуемой дальности действия, особой роли не играет.

Принципиальная схема, представленная на рис. 37, дает достаточно полное представление о гидролокаторе Ильичева и Свиньина. Генератор пилообразного

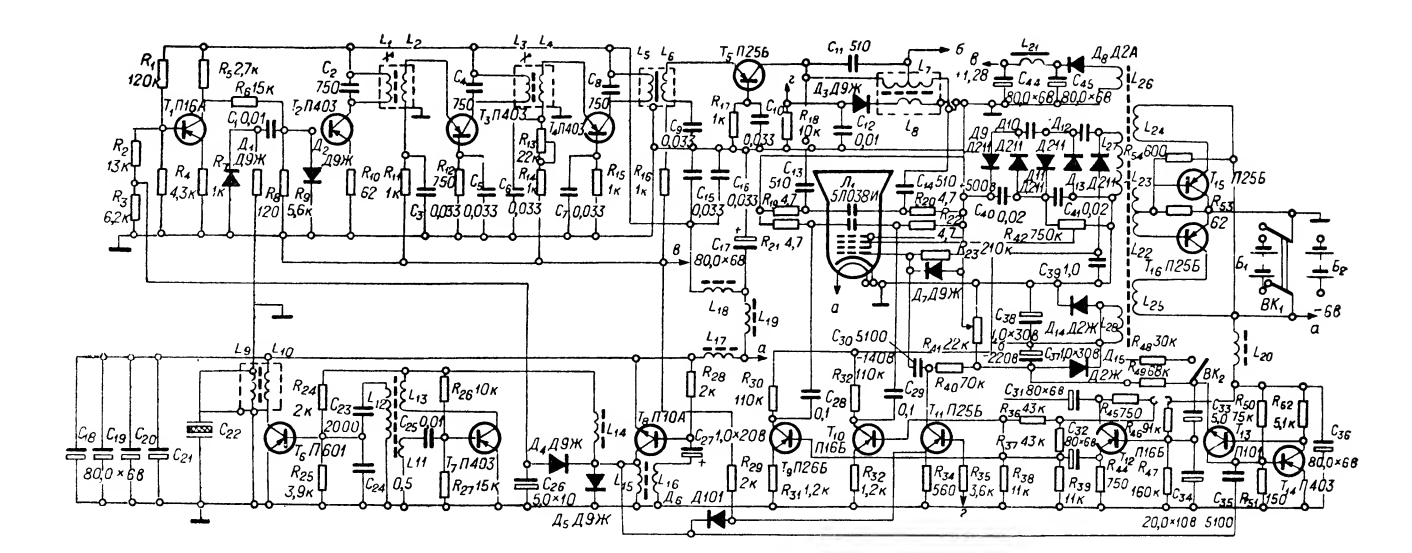


Рис. 37. Принципиальная схема любительского гидролокатора

T_1 — каскад ВАРУ; T_2, T_3, T_4 — УВЧ; T_5 — выходной каскад; T_6 — усилитель мощности; T_7 — задающий генератор; T_8 — модулятор; T_9, T_{10} — парофазный усилитель; T_{11} — видеоусилитель; T_{12} — инверсный каскад; T_{13}, T_{14} — генератор пилообразного напряжения; T_{15}, T_{16} — преобразователь напряжения

напряжения обеспечивает линейную развертку луча электроннолучевой трубки. Длительность развертки определяется интервалом между последовательными посылками. При принятых в гидролокаторах шкалах дистанции 0—10 *м* и 0—40 *м* длительность развертки составляет соответственно 13,5 и 53 *мсек*. Амплитуда напряжения развертки обеспечивает развертку на экране трубки длиной 40—45 *мм*. Напряжение развертки подается к отклоняющим пластинам трубки так, чтобы пловец видел луч перемещающимся по вертикали. В момент окончания цикла развертки вырабатывается отрицательный остроконечный импульс, запускающий модулятор.

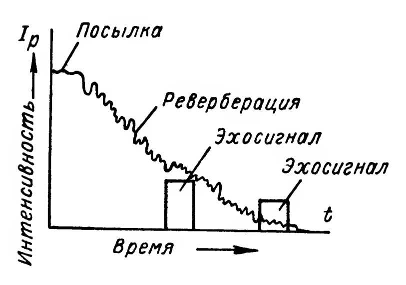


Рис. 38. Маскирующее действие реверберационной помехи.

Модулятор представляет собой заторможенный блокинг-генератор, вырабатывающий импульс длительностью 0,9 *мсек*. Этот импульс используется для запуска высокочастотного генератора, заряда конденсатора схемы временной автоматической регулировки напряжения (ВАРУ), о которой будет сказано несколько позже, и для гашения луча ЭЛТ на время излучения своей посылки. Импульс модуляции запускает высокочастотный генератор, который вырабатывает импульсы посылки длительностью 1 *мсек* с частотой заполнения 304 *кгц*. Он состоит из задающего генератора, собранного по трансформаторной схеме, и усилителя мощности. Электрическая мощность генератора составляет около 1,5 *вт*. При шкале дистанций 0—10 *м* посылки следуют с частотой 75 *имп/сек*, а при шкале 0—40 *м* — 19 *имп/сек*. После окончания каждого импульса генератор выключается и не создает помеху приему эхосигнала.

При приеме эхосигнал поступает на четырехкаскадный высокочастотный усилитель. В первом каскаде усиления осуществляется ВАРУ. Эта регулировка связана с особенностями работы гидроакустической

аппаратуры и является обязательной для всех активных гидроакустических средств, поэтому на ее работе следует остановиться подробнее. Ранее уже рассматривалась сущность явления реверберации. Напомним, что реверберация — звучание, ослабевающее со временем по экспоненциальному закону, создает сильную помеху приему эхосигналов (рис. 38). Поскольку реверберация сопровождает каждую посылку акустических сигналов и имеет частоту излучаемой посылки, то она беспрепятственно поступает в приемно-усилительный тракт. Эта помеха оглушает акустика и притупляет его слух, а попадая на электронный индикатор, засвечивает его. Приходится принимать специальные меры для ее устранения. Эффективной мерой борьбы с реверберацией и является применение схемы ВАРУ.

Сущность работы схемы заключается в том, что в момент излучения посылки происходит заряд конденсатора до некоторого напряжения, величина которого может регулироваться. Напряжение на конденсаторе определяет глубину регулирования. В рассматриваемом случае заряд конденсатора происходит импульсом, поступающим от модулятора. Напряжение, снимаемое с конденсатора, поступает в виде отрицательного смещения на регулируемый каскад (в данном случае на первый каскад усиления). При полностью заряженном конденсаторе усиление каскада оказывается минимальным. Но именно в это время на вход усилителя поступает максимальный сигнал реверберации. После окончания посылки конденсатор начинает разряжаться, и коэффициент усиления регулируемого каскада возрастает. Параллельно с этим происходит ослабление звучания реверберации. Параметры цепи разряда подбираются так, чтобы увеличение усиления и ослабление реверберации происходили примерно по одинаковому закону. Уровень звучания реверберации на выходе усилителя будет оставаться одинаковым независимо от его изменения на входе (рис. 39). В данной схеме параметры ВАРУ не изменяются, в более сложных схемах глубина регулирования и время разряда конденсатора могут устанавливаться оператором применительно к конкретным условиям.

В схеме предусмотрена также и ручная регулировка усиления.

Последующие три каскада обеспечивают усиление сигнала до величины, дающей уверенную регистрацию его на экране индикатора. Радиоимпульс с выхода усилителя подается на отклоняющие пластины трубки. Максимальный размах выброса луча на экране достигает 18 *мм*. Одновременно продетек-

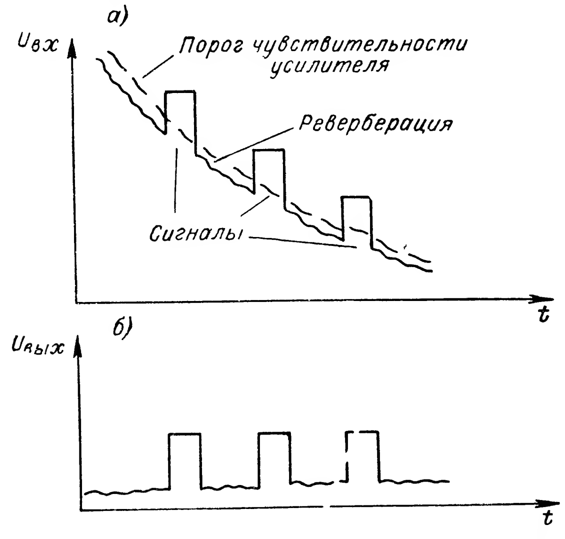


Рис. 39. Подавление реверберации схемой ВАРУ: *а* — напряжение на входе усилителя; *б* — напряжение на выходе усилителя

тированный сигнал усиливается и подается на управляющий электрод трубки, обеспечивая подсветку луча.

Источники питания — аккумуляторы СЦС-3 емкостью 3,5 *а. ч* — обеспечивают непрерывную работу гидролокатора в течение 7—8 *ч*. Напряжение источников 6 *в*, потребляемый ток 850 *ма*. Аккумуляторы собраны в две батареи, по четыре последовательно включенных элемента в каждой. Одна из батарей является рабочей, другая — резервной. Пловец может переключить батареи в случае выхода одной из строя. К аккумулятору подключен полупроводнико-

вый преобразователь, вырабатывающий необходимые для питания схемы напряжения.

Конструкция гидролокатора хорошо видна из рис. 40. Гидролокатор помещен в цилиндрический водонепроницаемый корпус диаметром 130 *мм* и длиной 380 *мм*. Все детали смонтированы на трех платах из фольгированного гетинакса. В качестве передней крышки корпуса используется акустическая антенна. Задняя крышка сделана из оргстекла,

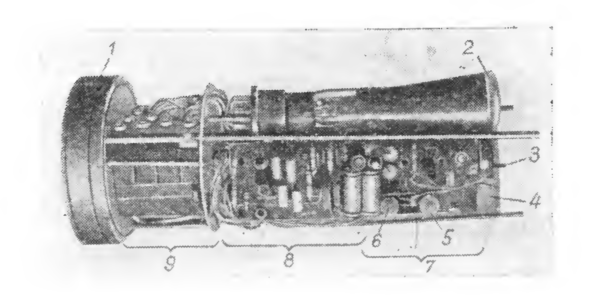


Рис. 40. Общий вид любительского гидролокатора со снятым кожухом

1 — акустическая антенна; *2* — экран электронного индикатора; *3* — переключатель диапазонов; *4* — выключатель питания; *5* — фокусировка; *6* — регулятор яркости; *7* — элементы развертки; *8* — элементы преобразователя напряжения; *9* — аккумуляторная батарея

и через нее пловец наблюдает за экраном трубки. На кожухе, представляющем собой дюралюминиевую трубу, размещены три ручки: включения и переключения питания, регулировки усиления и переключения диапазонов дальности. Опыт эксплуатации гидролокатора подтвердил правильность выбора его схемы и конструкции. Так, например, стандартный ориентир, применяемый в подводном спорте — деревянная призма длиной 4 *м*, имеющая крестообразное сечение с величиной сторон по 20 *см*, обнаруживалась при благоприятных условиях на расстоянии до 70 *м*. При самых неблагоприятных условиях эта дальность не падала ниже 10—15 *м*, т. е. значительно превышала дальность зрительного обнаружения ориентира. На расстоянии 30—40 *м* фиксировались аквалангист и стальной трос диаметром 6 *мм*,

на 10—15 *м* — рыба длиной 20 *см*. Глазом такую рыбку трудно было бы заметить на этом расстоянии даже в воздухе. Может быть именно эта цифра привлечет к гидроакустике внимание не одного рыболова-радиолюбителя.

Гидролокатор кругового обзора. Блок-схема гидролокатора кругового обзора приведена на рис. 41.

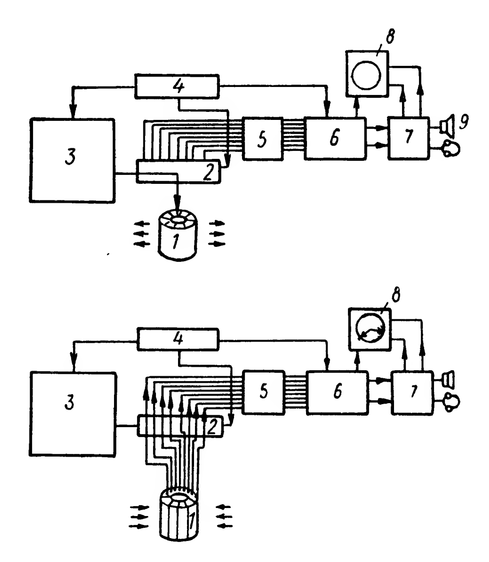


Рис. 41. Блок-схема гидролокатора кругового обзора

1 — акустическая антенна; *2* — коммутационное устройство; *3* — генератор; *4* — пульт управления; *5* — предварительные усилители; *6* — коммутатор кругового обзора; *7* — усилитель; *8* — индикатор кругового обзора

Хотя многие его элементы по названию схожи с элементами гидролокатора шагового обзора, они устроены и работают несколько иначе. В рассматриваемых гидролокаторах используется цилиндрическая акустическая антенна, состоящая из отдельных преобразователей.

Число преобразователей — секций может быть различным и доходит у современных гидролокаторов до нескольких десятков. Во время излучения все преобразователи включаются в параллель и возбуж-

даются генератором синфазно. Антенна совершает радиальные колебания, работая как одно целое. Акустической энергией равномерно облучается все окружающее пространство в плоскости наблюдения. При приеме каждая секция, являющаяся ненаправленным акустическим приемником, работает самостоятельно. Формирование диаграммы направленности осуществляется искусственно. Коммутационное устройство обеспечивает одновременное подключение всех секций антенны к генератору при излучении и раздельное подключение секции к усилителям при приеме.

Генератор электрических колебаний выполняет те же функции, что и у гидролокатора шагового обзора. Однако, так как здесь он обеспечивает облучение всего окружающего пространства, мощность его должна быть очень большой, составляя десятки, а иногда и сотни киловатт. Следует заметить, что в гидролокаторах с любым видом обзора используются, как правило, импульсные генераторы с накопительными устройствами. У таких гидролокаторов во время длительной паузы между посылками на специальных конденсаторах происходит накопление электрической энергии, потребляемой от источников питания Во время излучения посылки происходит быстрый разряд накопителей, и создаются колебания большой мощности. Так как интервал между посылками, длящийся секунды, оказывается много больше длительности импульса, составляющей десятки миллисекунд, средняя мощность, потребляемая генератором от сети, оказывается сравнительно небольшой.

При приеме сигнал с выходов секций антенны поступает прежде всего на предварительные усилители, в которых его уровень повышается до величины, необходимой для последующих преобразований. Поскольку секции акустической антенны являются ненаправленными приемниками, в состав приемного тракта гидролокатора входят специальные элементы формирования диаграммы направленности. Достаточно широко распространены два способа формирования диаграммы и обзора пространства.

Так, наиболее просто может быть сформирована одна быстро вращающаяся в плоскости обзора диа-

грамма. Скорость ее вращения должна быть такой, чтобы за время существования эхосигнала лепесток диаграммы совершил хотя бы один полный оборот Тогда, с какого бы направления не пришло эхо, оно поступит в приемный тракт. Формирование диаграммы направленности осуществляется электрическим путем, с применением задерживающей цепи. В каждый момент времени группа приемников, участвующая в формировании диаграммы направленности, подключается к звеньям задерживающей цепи. Сущность такого формирования диаграммы была пдробно рассмотрена в предыдущей главе.

Быстрое переключение приемников (скорость вращения лепестка диаграммы составляет несколько тысяч оборотов в минуту) осуществляется бесконтактным — емкостным коммутатором кругового обзора. Емкостный коммутатор представляет собой полый барабан, на внутренней поверхности которого, вдоль образующих, равномерно помещены пластины, служащие обкладками статора. Число пластин соответствует числу приемников. Внутри статора вращается цилиндрический ротор, на внешней поверхности которого также расположены пластины, к каждой из них подведены выводы звеньев задерживающей цепи, помещенной внутри ротора. При вращении пластины ротора поочередно проходят под пластинами статора, образуя переходные емкости, через которые сигнал от приемников попадает на задерживающую цепь. Соответственно вращается в горизонтальной плоскости и диаграмма направленности, сформированная задерживающей цепью.

Заметим, что в формировании диаграммы участвуют обычно не все приемники, а лишь часть их, обращенная в сторону принимаемого сигнала. Остальные приемники экранируются от сигнала конструкцией антенны, и использование их не представляет практического интереса. Для того чтобы несколько сэкономить на звеньях задерживающей цепи и некоторых других элементах схемы, для формирования приемной диаграммы используют лишь группу приемников, расположенную в секторе 120°. При вращении ротора коммутатора все время подключается по одному приемнику, расположенному по направлению

вращения, и отключается по одному с противоположной стороны. Число подключенных к задерживающей цепи приемников остается неизменным, но сами приемники непрерывно меняются, чем и обеспечи-

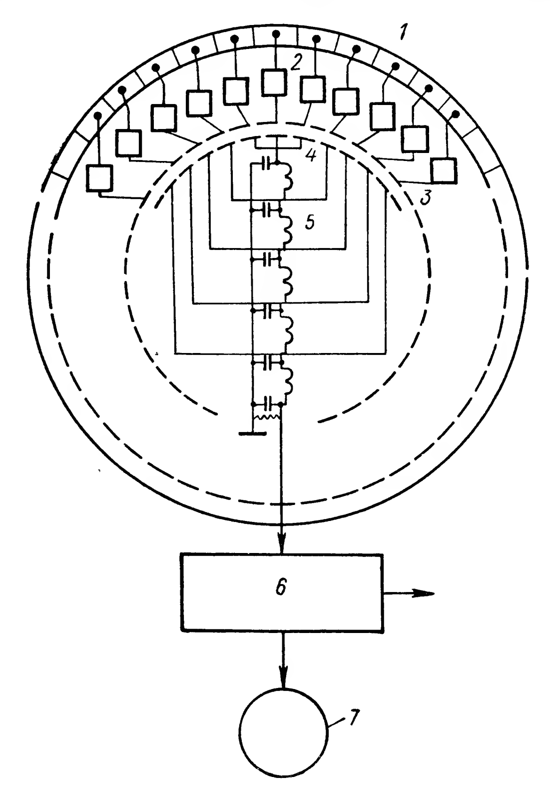


Рис. 42. Упрощенная схема приемного тракта гидролокатора кругового обзора с емкостным коммутатором

1 — секции акустической антенны; *2* — предварительные усилители: *3*, *4* — пластины статора и ротора емкостного коммутатора; *5* — задерживающая цепь; *6* — усилитель; *7* — ИКО

вается вращение лепестка и последовательный обзор горизонта. Схема приемного тракта с емкостным коммутатором приведена на рис. 42. Рассмотренный метод приема сигнала при круговом обзоре обладает весьма существенным недостатком. Так как лепесток

диаграммы направленности вращается, совершая один или несколько оборотов за время, равное длительности посылки, прием сигнала происходит только в течение времени, когда диаграмма направленности повернута в сторону цели. В следующий момент положение диаграммы изменится, и прием сигнала прекратится, хотя он продолжает поступать на антенну. Чем острее диаграмма направленности, тем меньшая часть энергии сигнала поступит в приемный тракт гидролокатора. Использование энергии сигнала оказывается очень нерациональным. Поэтому приемный тракт гидролокатора может быть построен по иному принципу.

В плоскости обзора формируются постоянно существующие или, как их называют, статически сформированные диаграммы направленности. Число их может быть равно или больше числа приемников. Ось максимума каждой характеристики повернута на свое направление, а все они равномерно располагаются по окружности. Таким образом, с помощью диаграмм направленности плоскость обзора разбивается на ряд секторов. Обзор осуществляется путем поочередного подключения (опроса) одного из каналов к индикатору. Приемно-усилительный тракт получается многоканальным.

Формирование статических характеристик производится также с помощью задерживающих цепей. При этом в каждом канале используется своя цепь. Каждый приемник участвует в формировании нескольких смежных каналов. Принцип такого формирования каналов нетрудно понять из рис. 43. Каждый канал имеет свой усилитель. На выходе канала помещается интегрирующее звено, на котором накапливается энергия сигнала за промежуток времени между опросами. Специальный электронный коммутатор поочередно «опрашивает» каналы, подключая их на короткое время ко входу индикатора. В момент подключения канала, в котором имеется сигнал, он регистрируется на экране электроннолучевой трубки. При таком методе обзора энергия проходящего сигнала используется практически без потерь.

При любом способе обзора принятый сигнал после

элементов формирования диаграммы направленности поступает на усилитель одноканальный или многоканальный, имеющий схемы АРУ и ВАРУ, и детектируется. Видеосигнал подается на индикатор кругового обзора (ИКО). В индикаторе кругового обзора применяется специфическая для гидроакустики спираль-

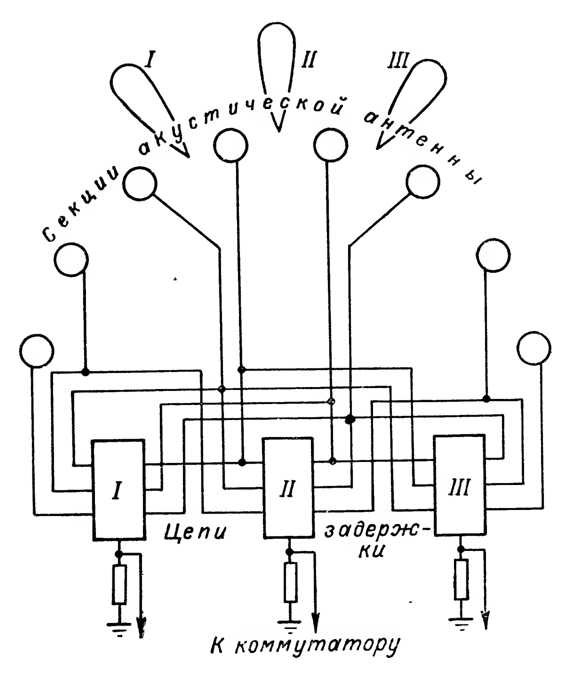


Рис. 43. Принцип формирования лепестков статической диаграммы направленности

ная развертка луча. Луч совершает вращательное движение синхронно с вращением или переключением диаграммы направленности и одновременно совершает радиальное перемещение от центра экрана трубки к его периферии со скоростью, пропорциональной скорости звука. В момент прихода сигнала на экране высвечивается яркое пятно, однозначно определяющее координаты обнаруженной цели. Для съема координат формируется электронный визир — светящийся вектор, конец которого оператор подводит

к отметке от цели. Направление электронного визира определяет угловую координату, длина — дистанцию на цели (рис. 44).

Гидролокаторы различных типов находят широкое применение в военных флотах всех стран, обеспечивая наблюдение за подводной обстановкой.

Гидролокатор с непрерывным излучением и частотной модуляцией сигнала. Для ознакомления

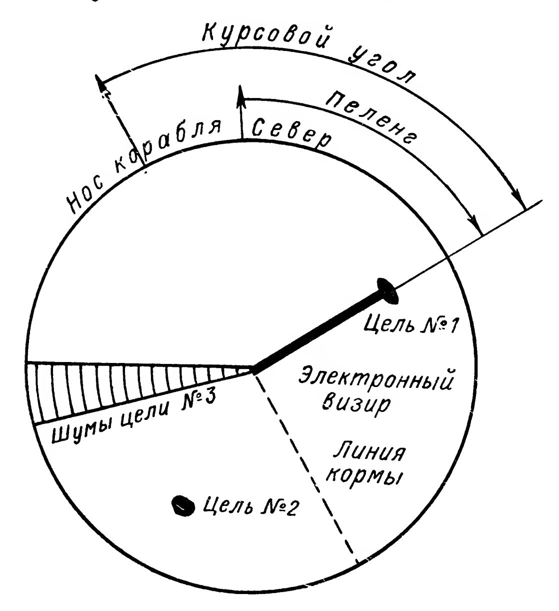


Рис. 44. Отображение информации на экране индикатора кругового обзора

с устройством и работой такого гидролокатора рассмотрим один из зарубежных образцов, предназначенный для использования подводными пловцами*. Назначение гидролокатора определило простоту его конструкции, небольшие габариты и вес. Вся аппаратура гидролокатора помещена в полусферический по форме корпус с двумя ручками для переноски (рис. 45). Вне корпуса находятся только две пары

* «Electronics», 1961, Dec., N 52, pp. 37—49.

водонепроницаемых головных телефонов с костной проводимостью, одна из которых используется пловцом, несущим гидролокатор, другая (выносная) — вторым водолазом, плывущим рядом. Гидролокатор может работать в двух режимах: в активном (основном) и пассивном (вспомогательном), когда пеленгуется работа специального гидроакустического

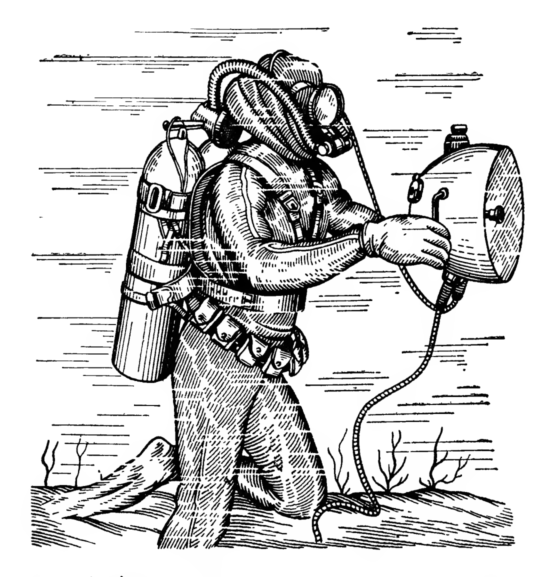


Рис. 45. Аквалангист с портативным гидролокатором

маячка или другого источника сигналов. Дальность действия в активном режиме составляет 35—40 *м*, в пассивном — зависит от мощности источника пеленгуемого сигнала.

Блок-схема гидролокатора представлена на рис. 46. Так как излучение и прием сигналов происходит непрерывно и одновременно, в аппаратуре используются раздельные излучатель и приемник, выполненные в виде единой акустической антенны. Рефлектором антенны служит передняя крышка корпуса, имеющая правильную вогнутую сферическую форму. Рефлектор фокусирует излучаемые и принимаемые колебания и формирует диаграмму направ-

ленности. По оси рефлектора размещены преобразователи, выполненные в виде трубы из колец титаната бария. Излучатель состоит из шести, приемник — из десяти колец. Кольца излучателя и приемника акустически изолированы друг от друга с помощью резиновой прокладки. Весь преобразователь помещен в сплошной изолирующий резиновый чехол.

В состав передающего тракта входит генератор пилообразного напряжения, период которого опреде-

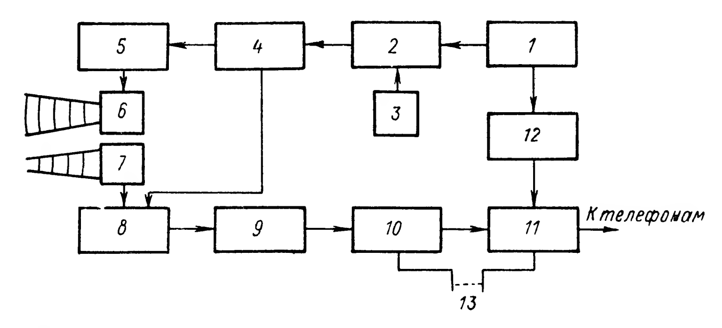


Рис. 46. Блок-схема переносного гидролокатора с непрерывным излучением и ЧМ сигнала

1 — генератор пилообразного напряжения; *2* — частотный модулятор; *3* — элементы ручной перестройки частоты; *4* — буферный каскад; *5* — усилитель мощности; *6, 7* — антенны передающая (*6*) и приемная (*7*); *8* — балансный модулятор; *9—11* — усилители; *12* — усилитель гасящих импульсов; *13* — детектор течи

ляется используемой в гидролокаторе шкалой дальности. Предусмотрена возможность работы на трех шкалах: 0—6 *м*, 0—18 *м* и 0—36 *м*. Напряжение генератора управляет работой частотного модулятора, на выходе которого образуются колебания с частотой, меняющейся по пилообразному закону. При работе в пассивном режиме частотный модулятор является гетеродином, обеспечивающим возможность прослушивания высокочастотных сигналов. Частота его лежит в диапазоне от 30 до 40 *кгц* и может перестраиваться оператором.

Через буферный каскад сформированный сигнал подается на усилитель мощности, затем на излучатель, а также в приемный тракт, где служит для формирования мгновенной разностной частоты.

Передающий тракт гидролокатора должен обеспечить линейную зависимость излучаемой частоты от времени при изменениях внешней температуры в широких пределах (от 0 до 50° С) и напряжения источников питания. В этих условиях частота должна меняться не более чем на 1%. Для обеспечения такой стабильности в схеме тракта предусмотрена температурная компенсация.

Принимаемый эхосигнал поступает на балансный модулятор, в котором происходит формирование суммарной и разностной частот для мгновенных значений принимаемой и излучаемой частот. Для определения дистанции до цели используется только разностная частота. При пассивном режиме работы в балансном модуляторе принятый сигнал преобразуется в сигнал звуковой частоты, лежащий в диапазоне 250—2500 *гц*. Далее сигнал поступает на усилитель с частотной коррекцией. В этом усилителе устраняется разница в уровне приходящего сигнала, образующаяся в результате неравномерности затухания частотных составляющих сигнала при распространении в воде, а также изменения дистанций до цели, и обеспечивается постоянство уровня слышимого сигнала. Сигнал усиливается до уровня, необходимого для работы головных телефонов. Специальный каскад запирает выход усилителя на время обратного хода пилообразного напряжения.

Попадание воды внутрь корпуса гидролокатора может вывести его из строя. Чтобы избежать этого, предусмотрена цепь обратной связи, образующая так называемый детектор течи. Даже несколько капель воды замыкают проволочные электроды, помещенные в самой нижней части корпуса, и возбуждают усилитель, подавая водолазу тревожный звуковой сигнал.

При работе в пассивном режиме излучатель, усилитель мощности передающего тракта и каскад гашения обратного хода пилообразного напряжения отключаются.

Корпус гидролокатора отлит из алюминия и герметически закрывается передней крышкой — рефлектором антенны. Все элементы схемы выполнены в виде платы с печатным монтажем. Источники

питания — обычные сухие элементы для карманного фонаря. На корпусе размещены рукоятки для переноски и ручки управления и закреплен магнитный компас, подсвечиваемый лампочкой, с помощью которого пловец может определять пеленг на цель. Изменение дистанции до цели, ее увеличение или уменьшение, определяется водолазом по изменению

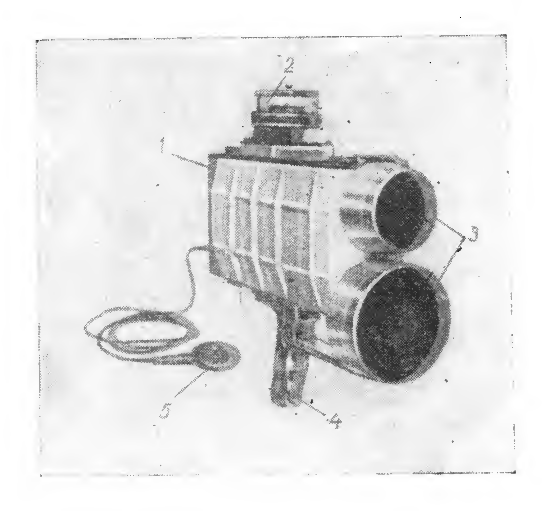


Рис. 47. Портативный гидролокатор для аквалангистов

1 — панель управления; *2* — магнитный компас; *3* — акустические антенны; *4* — рукоятка; *5* — головной телефон

высоты тона звукового сигнала. Аппаратура может работать при глубине погружения до 60 *м*. Вес гидролокатора не превышает нескольких килограммов, а в воде он имеет даже небольшую положительную плавучесть (около 200 *г*).

На рис. 47 показан другой гидролокатор для аквалангистов с ЧМ сигнала, также работающий в активном или пассивном режиме. Его можно использовать на глубинах до 200 *м* при дальности действия до 180 *м*. В нем использованы электронные схемы на твердом теле и интегральные схемы, что позволило предельно уменьшить вес (4,5 *кг* в воздухе и около 900 *г* в воде) и габариты (высота 30 *см* вместе

с ручкой пистолетного типа, ширина 12 *см*, длина 34 *см*). Сухие батареи обеспечивают непрерывную работу в активном режиме в течение 10, в пассивном — 20 *ч*. На верхней части корпуса помещен компас с подсветкой. Можно предполагать, что простые, удобные в обращении, небольшие по габаритам и весу гидролокаторы смогут найти широкое применение у спортсменов-подводников и легководолазов-профессионалов.

24. Шумопеленгаторы

Наряду с активными гидролокационными средствами для наблюдения за подводной обстановкой широко применяются и пассивные средства — шумопеленгаторы. В качестве полезного сигнала в них используют шумы, возникающие в воде при движении кораблей и подводных лодок, при движении и жизнедеятельности морских животных и рыб. Несмотря на то, что эти шумы создаются непреднамеренно и часто имеют очень небольшую мощность, они способны распространяться в воде на очень большие расстояния . Шумы, создаваемые различными источниками, существенно отличаются по своему спектру, ритму и другим характерным признакам, которые позволяют оператору почти безошибочно определить их источник. Как утверждает один из зарубежных специалистов, «спутать шумы торпедного катера и подводной лодки так же трудно, как спутать шум самолета с шумом извозчика. Опытные операторы... умеют по характеру шума, узнавать проходящие корабли... точно так же, как они узнают своих знакомых по голосу». Следует заметить, что с шумами кораблей и особенно подводных лодок энергично борются кораблестроители. Однако развиваются и шумопеленгаторы, применяются новые методы выделения полезных шумов на фоне хаотической шумовой помехи. Как сообщают на страницах зарубежной печати, современные шумопеленгаторы позволяют обнаруживать корабли на расстоянии 200 *км* и более. Дальность слышимости подобных шумов в воздухе была бы в десятки и сотни раз меньшей.

Шумопеленгаторы используются, как правило,

подводными лодками. Это объясняется двумя причинами: шумность подводных лодок меньше, чем надводных кораблей, и поэтому уровень собственных акустических помех на лодке ниже; поскольку надводный корабль шумит значительно сильнее, чем

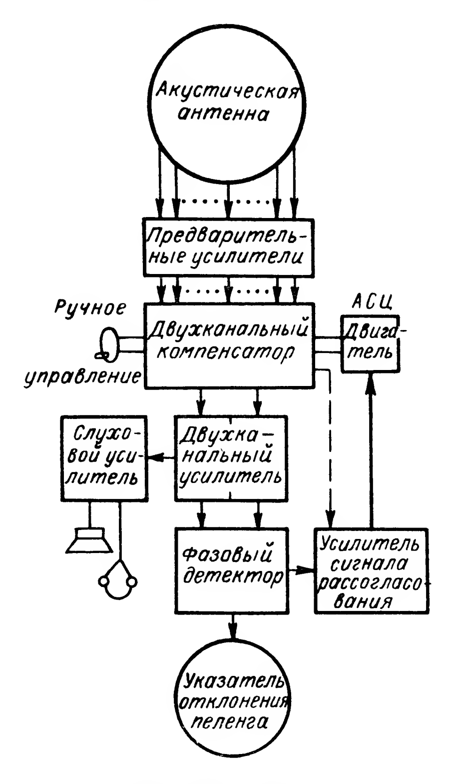


Рис. 48. Блок-схема шумопеленгатора

подводная лодка, обнаруживать корабль с лодки можно на значительно большей дистанции, чем лодку с корабля. Устройство шумопеленгатора значительно проще, чем гидролокатора. Шумопеленгаторы не имеют громоздкого и потребляющего большие мощности передающего тракта. Однако в их состав могут входить и некоторые элементы, не используемые в гидролокаторах. Блок-схема одного из

вариантов шумопеленгатора приведена на рис. 48. Особенности ее заключаются в следующем.

Акустические антенны шумопеленгаторов должны принимать очень слабые сигналы на сравнительно низких частотах. Поэтому их размеры обычно очень велики, и состоят они из большого числа приемников. Последние могут размещаться в виде цилиндра, сферы, эллипса, окружности, линии и т. п. Форма антенны зависит главным образом от возможности размещения ее на подводной лодке.

Слабые сигналы с приемников поступают на предварительные усилители, число которых соответствует числу приемников. Элементы формирования и вращения диаграммы направленности представляют собой электрический компенсатор с задерживающей цепью. Если пеленгование осуществляется фазометрическими методами, компенсатор делается двухканальным и формирует два лепестка диаграммы направленности: правый и левый. Управление вращением компенсатора может осуществляться оператором вручную или же схемой слежения при автоматическом сопровождении цели по пеленгу.

После компенсатора сигнал поступает на двухканальный усилитель. В отличие от гидролокатора, работающего на фиксированной частоте, шумопеленгатор является широкополосным устройством. В усилителе имеется возможность настраиваться на нужный диапазон частот и изменять полосу пропускания при выборе оптимальных условий наблюдения в различных конкретных условиях.

Для определения пеленга используется электронный индикатор, называемый указателем отклонения пеленга. Наблюдая за изменением характера изображения сигнала на его экране, оператор поворачивает ось диаграммы направленности до совпадения ее с направлением на цель и в момент совпадения берет отсчет по шкале компенсатора. На выходе двухканального усилителя может быть включен фазочувствительный детектор (ФЧД) или другое подобное устройство, вырабатывающее напряжение постоянного тока, пропорциональное углу сдвига фаз акустических колебаний, приходящих в правый и левый каналы. При сдвиге фаз, равном нулю, напряжение

на выходе ФЧД также будет равно нулю; при неравенстве фаз на выходе ФЧД появится напряжение соответствующей амплитуды и знака. Это напряжение является сигналом рассогласования, управляющим следящей системой. После усиления этот сигнал поступает на схему автоматического сопровождения цели (АСЦ). Он управляет работой исполнительного двигателя, который разворачивает барабан электрического компенсатора, а следовательно, и ось диаграммы направленности. По мере приближения оси к направлению на цель уменьшается сдвиг фаз сигнала и уменьшается сигнал рассогласования. В момент совпадения оси диаграммы направленности с направлением на цель сдвиг фаз, а следовательно, и сигнал рассогласования становятся равными нулю, двигатель останавливается. Элементы обратной связи в системе слежения обеспечивают плавную работу системы и исключают возможность возникновения незатухающих колебаний. По мере изменения направления на цель следящая система АСЦ плавно поворачивает компенсатор. Во время автоматического сопровождения задача оператора сводится к контролю за работой системы АСЦ путем наблюдения за сигналом на экране индикатора. Шумопеленгаторы находят применение как в военном деле, так и в народном хозяйстве.

25. Эхолоты

Одним из наиболее распространенных гидроакустических устройств является эхолот — навигационный прибор, предназначенный для определения глубины под килем корабля. Эхолоты в наши дни устанавливаются практически на всех без исключения морских судах, а в некоторых случаях и на речных, независимо от их водоизмещения, в том числе и на любительских катерах. Самодельные простейшие эхолоты установлены уже на некоторых катерах наших отечественных спортсменов-радиолюбителей. По принципу своего действия эхолот является разновидностью импульсного гидролокатора, излучающего посылки в вертикальной плоскости и принимающего эхосигналы, отраженные от дна. Несмотря на то, что

конструкции современных эхолотов чрезвычайно многообразны, все они имеют много общего, поэтому мы ограничимся рассмотрением устройства простейшего эхолота, схема которого приведена на рис. 49.

Эхолот имеет две раздельные акустические антенны — излучающую и приемную. Электромеханиче-

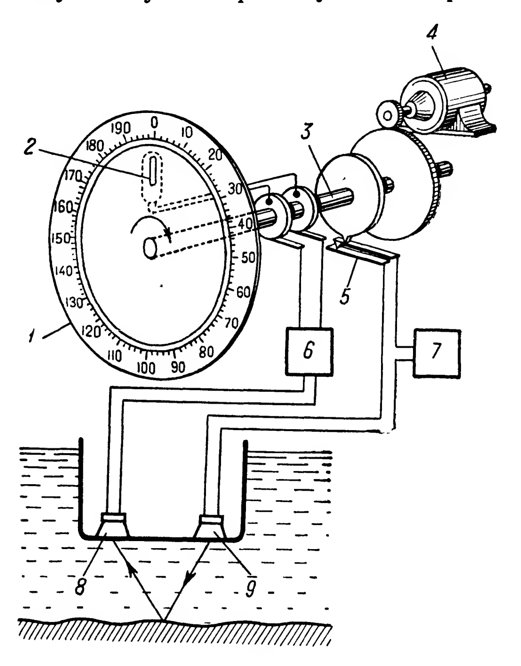


Рис. 49. Принцип устройства простейшего эхолота

1 — шкала глубин; *2* — неоновая лампочка; *3* — диск с управляющим кулачком; *4* — двигатель; *5* — посылочные контакты; *6* — усилитель; *7* — генератор; *8* и *9* — акустические антенны — приемная и излучающая

ская схема обеспечивает управление работой прибора и регистрацию измеряемой глубины. Двигатель с постоянной скоростью вращает вал, на котором закреплены диски с управляющим кулачком и с индикаторной неоновой лампочкой. В диске с неоновой лампочкой имеется щель, через которую можно наблюдать ее свечение. Он вращается за прозрачной

круговой шкалой, на которой нанесены значения глубин. В момент, когда вращающаяся со своим диском лампочка проходит через нуль шкалы, диск с кулачком замыкает посылочные контакты и подключает генератор к излучателю. Генератор может быть ламповым. В некоторых случаях вместо генератора используют конденсатор, заряжаемый в период паузы от источника постоянного напряжения. В момент подключения конденсатора к обмотке магнитострикционного излучателя образуется колебательный контур, в котором возникают мощные затухающие колебания. Излучение длится 1—3 *мсек*. В навигационных эхолотах, измеряющих глубины 250—350 *м*, используется частота колебаний порядка 40 *кгц*.

Излученный эхолотом импульс направляется в сторону дна, отражается и в виде эха возвращается к приемнику. В течение этого времени диск продолжает вращаться. Если максимальная глубина, на которую рассчитан эхолот, равна h_{max}, диск должен будет совершить один полный оборот за время $t = 2h_{max}/c$. Следовательно, диск сделает $n = 60/t$ *об/мин*. Так, например, приняв скорость звука равной 1500 *м/сек*, при шкале, равной 200 *м*, диск должен вращаться со скоростью $n = \frac{60 \cdot 1500}{2 \cdot 200} = 225$ *об/мин*.

Принятый эхосигнал усиливается и через контактные кольца подается на вращающуюся неоновую лампочку. К моменту прихода эха диск с лампочкой развернется на угол, пропорциональный измеряемой глубине. Вспышка лампочки произойдет против соответствующего деления шкалы, с которой и считывается глубина. Так как диск вращается непрерывно, циклы работы эхолота все время повторяются.

Рассмотренный визуальный индикатор позволяет лишь взять отсчет глубины, но не зафиксировать ее. Поэтому в настоящее время находят все более широкое распространение эхолоты с электроннолучевыми индикаторами и самописцами-регистраторами глубины. При включенном самописце на бумаге фиксируется глубина на всем протяжении пути судна. На основании таких эхограмм производится подробное картографирование морского дна. С помощью эхолотов советские ученые-моряки открыли и нанесли на

карты подводный хребет Ломоносова в Арктике, глубоководную впадину Лазарева в Антарктике и многие примечательные неровности морского дна.

Простейший эхолот сравнительно легко может быть воспроизведен квалифицированными радиолюбителями. Именно такой эхолот сделали Н. С. Яковчук и Г. М. Свердлин * для катера. Он позволяет измерять глубину до 30 *м,* обнаруживать отдельные препятствия, а в некоторых случаях, возможно, осуществлять и поиск рыбы.

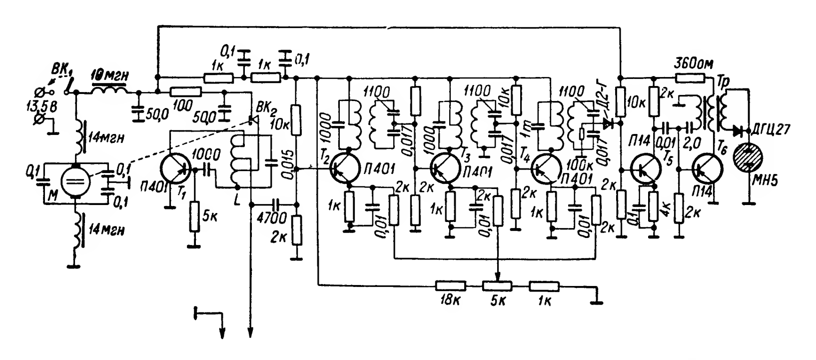


Рис. 50. Принципиальная схема любительского эхолота

T_1 — генератор; $T_{2,3,4}$ — резонансные усилители; T_5 — усилитель мощности; T_6 — блокинг-генератор

Принципиальная схема эхолота приведена на рис. 50. Эхолот имеет совмещенную приемно-излучающую антенну, выполненную из пластинки титаната бария. Квадратная пластинка размером 25×25×5 *мм* с алюминиевой накладкой является колебательной системой. По контуру она обтянута резиной, обеспечивающей акустическую развязку системы от корпуса. Корпус изготовлен путем заливки колебательной системы эпоксидной смолой и, после ее затвердевания, обточкой до нужной формы и размеров. Сторона, обращенная к воде, является мембраной. Готовый корпус покрывается с боков нерабочей стороны

---

* Н. С. Яковчук, Г. М. Свердлин. Эхолот для туристских судов. В сб. «Катера и яхты». Вып. 1. Судпромгиз, 1963, стр. 95—96.

защитным резиновым чехлом. Во время работы антенна свешивается за борт катера на коаксиальном кабеле. При этом рабочая поверхность должна быть обращена в сторону дна и сохранять строго горизонтальное положение.

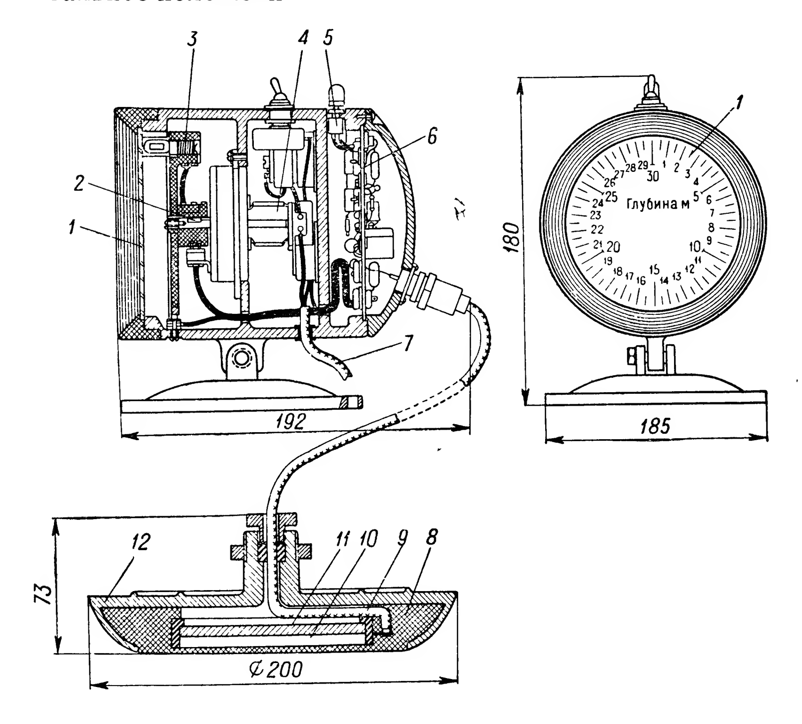


Рис. 51. Общий вид любительского эхолота

1 — шкала глубин; *2* — диск; *3* — неоновая лампочка; *4* — двигатель; *5* — потенциометр (регулятор усиления); *6* — монтажная плата; *7* — шланг питания; *8* — эпоксидная смола; *9* — резиновая прокладка; *10* — титанат бария; *11* — дюралевая накладка; *12* — резиновый корпус

Схема эхолота работает следующим образом. Генератор с колебательным контуром, выполненный по трехточечной схеме, возбуждается в момент замыкания вращающимся диском контактов $ВК_2$ и излучает импульс длительностью около 0,5 *мсек* с частотой заполнения 227 *кгц*. Антенна подключается к контуру по автотрансформаторной схеме, что сводит к минимуму потери и позволяет согласовать генератор

с нагрузкой. Принятый эхосигнал поступает на три последовательно включенных резонансных каскада усиления. Предусмотрена возможность регулировки усиления путем изменения напряжения, прилагаемого к базам транзисторов, и смещения за счет этого их рабочих точек.

Усиленный сигнал детектируется и в виде прямоугольного импульса отрицательной полярности подается на импульсный усилитель мощности. Последовательно с усилителем подключен ждущий блокинг-генератор, на выходе которого имеется трансформатор с тремя обмотками, в одну из которых включена индикаторная неоновая лампочка. Эта лампочка закреплена на диске, вращающемся с постоянной скоростью, равной для принятого значения шкалы (30 *м*) 1500 *об/мин*. Лампочка вспыхивает в течение каждого оборота дважды: в момент посылки, когда она находится у нуля шкалы, и в момент прихода эха.

Вся радиоэлектронная часть аппаратуры монтируется на общей плате и вместе с мотором, шкалой, редуктором и другими элементами помещается в корпус небольших размеров, легко устанавливаемый на борт катера или шлюпки (рис. 51). Источники питания эхолота — батареи 12—13,5 *в*. Подобные эхолоты могут найти широкое применение у любителей водного спорта, туристов, рыболовов, использоваться при выполнении различных работ с применением малотоннажных катеров и судов.

26. Рыбопоисковые приборы

Море является неиссякаемой кладовой первоклассных продуктов питания. Мировая добыча рыбы уже превысила 55 млн. *т*. Широко известны выдающиеся успехи советских рыбаков. Директивы XXIII съезда КПСС предусматривают увеличение лова рыбы еще на 50—60%, а в следующей пятилетке — вдвое. Эта задача не может быть решена только за счет роста промыслового флота. В решении ее большая роль отводится новейшим рыбопоисковым устройствам и другой совершенной радиоэлектронной аппаратуре.

Посетители международной выставки «Инрыбпром-68» подолгу задерживались в советском

павильоне у стендов с приборами, носящими звучные названия: «Язь», «Судак», «Кальмар», «Палтус-М», «Омуль»... Немало образцов рыбопоисковой аппаратуры представили ГДР, Польша и другие страны — участники выставки. Вся рыбопоисковая аппаратура основана на принципах гидролокации и отличается, главным образом, техническими параметрами, конструкцией, габаритами, весом и объемом получаемой информации. Так, например, рыбопоисковый эхолот «Язь», предназначенный для установки на шлюпках, весит менее 15 *кг* и позволяет обнаруживать скопления рыбы непосредственно под килем на удалении до 160 *м*. Гидроакустическая станция для больших и средних промысловых судов «Палтус-М» весит около 1200 *кг* и позволяет вести поиск косяков рыбы в горизонтальной и вертикальной плоскостях на глубинах до 400 *м* и на удалении до 2—4 тыс. *м* по горизонту.

Простейший малогабаритный рыбопоисковый прибор «Язь» по своему устройству и конструкции во многом схож с рассмотренным ранее эхолотом. Важнейшим отличием его является принцип регистрации эхосигнала. В эхолоте сигнал отражается от дна и приходит после каждой посылки. В рыбопоисковом устройстве целью являются небольшие скопления рыб, а иногда и отдельные рыбы, слабо отражающие акустическую энергию, и эхосигналы имеют меньшую интенсивность и приходят нерегулярно. Поэтому регистрация сигналов на глаз, как в эхолоте, является ненадежной и не может обеспечить своевременное и уверенное обнаружение рыбы. Для улучшения фиксирования эхосигналов в рыбопоисковых устройствах применяются регистраторы, позволяющие осуществлять запись даже единичных сигналов на бумажную ленту. Так устроена и станция «Язь».

Упрощенная электрокинематическая схема этой станции приведена на рис. 52. Собрана она на полупроводниковых элементах. При излучении двухтактный генератор излучает импульсы длительностью 0,3 *мсек* с частотой заполнения около 80 *кгц*. Частота следования 280 *имп/мин* соответствует максимальной измеряемой дальности 160 *м*. На этом расстоянии могут быть зарегистрированы отражения от дна.

Излучаемая мощность достаточна для обнаружения разреженных скоплений рыбы на глубине до 30 *м*, а плотных — до 70 *м*. При излучении и приеме используется единая акустическая антенна *1*, изготовленная из титаната бария.

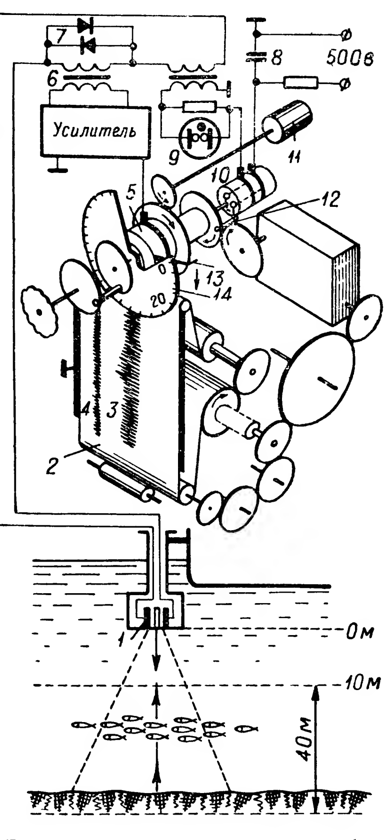


Рис. 52. Упрощенная схема рыбопоискового эхолота «Язь»

Для переключения антенны в соответствующий режим работы служит коммутационное устройство, представляющее собой трансформатор *6*, одна из обмоток которого соединена со входом усилителя, а другая — последовательно с антенной и с выходным трансформатором генератора. Эта обмотка шунтирована двумя кремниевыми диодами *7*.

В момент излучения высокого напряжения внутреннее сопротивление диодов резко падает, и они шунтируют трансформатор, защищая тем самым вход усилителя от повреждения. При приеме слабое напряжение сигнала оказывается недостаточным для открывания диодов, и трансформатор является входным для усилителя. В состав усилителя входят три резонансных каскада и каскад усиления мощности.

Управление излучением посылки, регистрация глубины обнаружения рыбы и запись эхосигналов осуществляются с помощью электромеханического устройства, имеющего некоторое сходство с анало-

гичным блоком рассмотренного ранее эхолота. Двигатель *11* с постоянной скоростью вращения разворачивает вал, на котором находятся диск-коллектор *5* с пером *13* и диск с контактным пальцем *12*. Перед вращающимся коллектором помещена прозрачная круговая шкала глубин *14*, отградуированная от 0 до 160 *м*. В момент прохода пера через нуль шкалы контактный палец замыкает посылочные контакты *10*, и напряжение с выхода генератора *8* поступает в антенну. Излучается импульс акустической энергии. Одновременно вспыхивает контрольная неоновая лампочка *9*, сигнализирующая об исправности схемы.

В передней части прибора, ниже центра шкалы, располагается лента *2* из специальной электрохимической бумаги. Ширина бумажной ленты равна хорде, стягивающей $^1/_4$ окружности шкалы. Благодаря этому при вращении коллектора перо в течение $^1/_4$ времени оборота скользит по ленте и записывает приходящие сигналы. Оператор может повернуть шкалу глубин вокруг оси, подводя ленту под любую часть шкалы протяженностью 40 *м*. При этом оператор выбирает тот участок глубин, который его наиболее интересует и в пределах которого он хочет получить запись эхосигналов. Одновременно со шкалой поворачивается и барабан с посылочными контактами. Благодаря этому независимо от разворота шкалы относительно бумаги излучение посылки будет происходить всегда в момент, когда перо проходит через нуль шкалы.

В положении, показанном на рисунке, шкала развернута относительно бумаги так, что на ленте должны записываться сигналы, приходящие с глубин от 10 до 50 *м*. Вращающееся перо начнет движение по бумаге лишь после того, как пройдет время, необходимое звуку для прохождения расстояния, равного 10 *м*. Если в это время и поступит эхо, оно не будет записано, так как перо еще не достигнет бумаги. Если же эхо придет после того, как перо попадет на бумагу, протекающий через него ток прожжет бумагу, оставляя на ней хорошо заметную отметку. Криволинейность движения пера не вызывает появления какихлибо дополнительных ошибок записи, так как глубина цели также считывается по криволинейной

шкале. Бумажная лента протягивается сверху вниз с постоянной скоростью, поэтому запись эха *3* от крупной цели будет происходить многократно, образуя график — эхограмму. Случайные ложные отражения и помехи записываются на ленте незакономерно, не затемняя основную запись. Если глубина моря в районе наблюдения лежит в пределах записываемого диапазона, на эхограмме производится четкая запись отражения от дня *4*. Таким образом, рыбопоисковое устройство одновременно является и эхолотом.

На крупных рыбопромысловых судах используются более совершенные и сложные приборы. Они могут иметь выдвижные антенны, совершенные самописцы, электронные индикаторы, более сложные ламповые генераторы и другие устройства (рис. 53). Такие приборы позволяют успешно осуществлять поиск рыбы на расстоянии до нескольких километров в горизонтальной плоскости и до нескольких сотен метров по глубине. Гидроакустические рыбопоисковые устройства применяются также для различных исследований, связанных с изучением жизни морских животных и рыб. Так, в частности, большой опыт использования специальной гидроакустической техники в этих целях был накоплен во время многочисленных экспедиций первой в мире советской исследовательской подводной лодки «Северянка».

Применение гидроакустики в рыболовном промысле далеко не ограничивается поиском рыбы. Так, созданы приборы для прицельного лова рыбы, когда орудия лова — разноглубинные тралы наводятся на косяк рыбы по глубине. Подобные приборы называются эхолотными кабельными измерителями глубины (ИГЭК), или сетевыми зондами.

В состав аппаратуры сетевого зонда (рис. 54) входят две акустических антенны, одна из которых устанавливается, как у обычного рыбопоискового эхолота, в днище судна и обеспечивает измерение глубины движения косяка рыбы, а другая прикрепляется к устью трала. Специальная конструкция корпуса траловой антенны обеспечивает сохранение ею горизонтального положения под воздействием встречного потока воды во время движения трала. Приемно-усилительная аппаратура, самописец и генератор

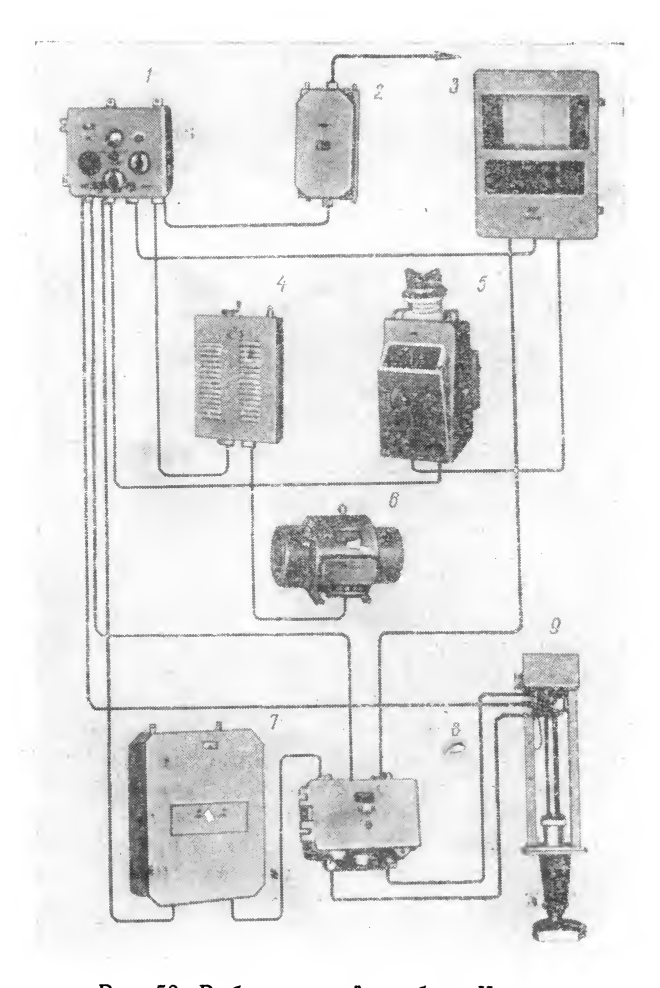


Рис. 53. Рыбопоисковый прибор «Кальмар»

1 — блок управления; *2* — сетевой фильтр; *3* — самописец; *4* — пусковой реостат; *5* — электронный индикатор; *6* — мотор-генератор; *7* — генератор электрических колебаний; *8* — кабельная коробка; *9* — выдвижное устройство с акустической антенной.

размещаются на борту судна. Бортовая аппаратура соединяется с траловой антенной кабелем.

Переключающее устройство, входящее в состав аппаратуры, обеспечивает возможность работы сетевого зонда в трех режимах: в режиме обычного измерения глубины, когда используется только корабельная антенна; в режиме измерения глубины хода трала, его вертикального раскрытия и наблюдения за рыбой в зоне трала, когда используется только траловая антенна; в режиме совместной работы, когда на ленте

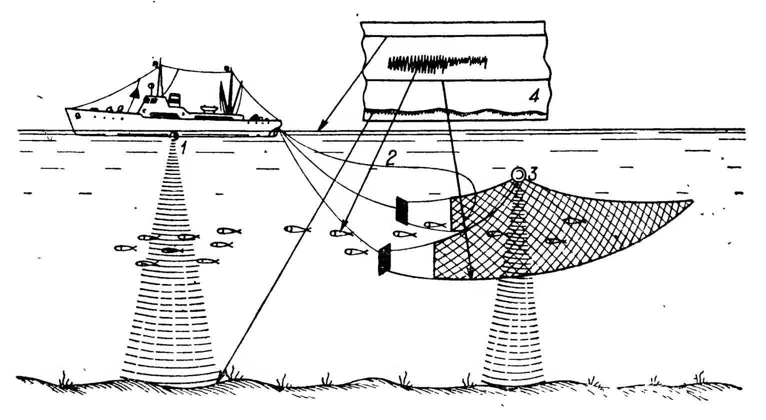


Рис. 54. Работа сетевого зонда

1 — корабельная антенна; *2* — кабель; *3* — траловая антенна; *4* — запись на ленте самописца

самописца одновременно регистрируется обстановка под килем судна и в зоне трала. Получаемая при этом информация позволяет выбирать оптимальный режим траления, оценить ожидаемый улов и увеличить его за счет прицельного наведения трала на рыбу.

В настоящее время созданы и еще более совершенные гидроакустические устройства — бескабельные сетевые зонды. В них информация от траловой антенны на корабль передается кодированными сигналами по специальному телеметрическому гидроакустическому каналу. Применение телеметрического канала вместо кабеля повышает срок службы зонда, так как в этом случае исключается возможность

повреждения кабеля при постановке, буксировке и уборке трала. Гидроакустическая аппаратура находит применение в рыболовном промысле и при решении некоторых других задач.

27. Звукоподводная связь

Среди многочисленных гидроакустических средств одними из наиболее старых и распространенных являются средства звукоподводной связи (ЗПС). С их помощью оказывается возможным поддерживать надежную двухстороннюю телеграфную или телефонную связь между объектами, находящимися на любой глубине, или между подводными объектами и кораблями или берегом. Так, например, подводный телефон позволил поддерживать непрерывную связь батискафа «Триест» во время его рекордного погружения на глубину около 11 *км* с кораблями на поверхности, обеспечивающими погружение.

Надо заметить, что между техникой ЗПС и радиосвязью имеется много общего. Однако особенности распространения звука в воде существенно влияют на работу аппаратуры ЗПС. Так, например, многолучевое распространение акустических сигналов приводит к тому, что сигнал в точке приема, являясь результатом интерференции отдельных составляющих, пришедших различными путями, может существенно отличаться от сигнала в точке передачи. В результате могут исказиться основные параметры сигнала: амплитуда, длительность, форма, фазовые соотношения. Это обстоятельство налагает определенные ограничения на возможности использования в ЗПС некоторых видов модуляции. Неравномерное затухание звука с частотой (более сильное затухание на высоких частотах) приводит к искажению спектра сигнала на больших удалениях от источника. Однако, несмотря на все эти трудности, ЗПС успешно развивается и достигла значительных успехов.

Широкое распространение в настоящее время получила аппаратура ЗПС с использованием амплитудной модуляции сигнала и излучением одной боковой полосы частот. Напомним, что в обычном

амплитудно-модулированном сигнале обе боковые полосы несут одинаковую информацию, а несущая частота, на передачу которой тратится большая часть энергии, вообще никакой информации не содержит. Поэтому переход на однополосную связь позволил получить большой энергетический выигрыш и значительно уменьшить общую полосу сигнала без каких-либо потерь информации. Однополосные сигналы

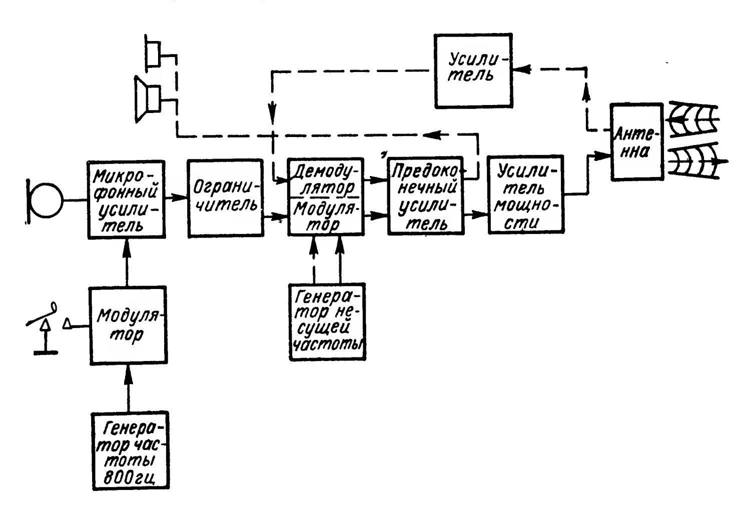


Рис. 55. Блок-схема станции однополосной звукоподводной связи

оказались наиболее пригодными для использования в гидроакустической аппаратуре. Блок-схема аппаратуры ЗПС, работающей по этому принципу, приведена на рис. 55.

Аппаратура может работать как в телефонном, так и в телеграфном режимах. При работе в телеграфном режиме частотная модуляция сигнала осуществляется отдельным генератором с частотой 800 *гц*. Телефонный сигнал подвергается ограничению («клиппированию»), при котором уменьшаются мощные низкочастотные составляющие спектра человеческой речи, несущие небольшую информацию, и подчеркиваются более важные, с точки зрения разборчивости сигнала, высокочастотные составляющие

С помощью фильтра полоса сигнала ограничивается диапазоном 250—3000 *гц*. Этот сигнал поступает на балансный модулятор, куда подается также несущая частота, равная 8 *кгц*. В модуляторе происходит формирование однополосного сигнала: несущая частота и одна из боковых полос практически полностью подавляются. После усиления окончательно сформированный сигнал подается на акустическую антенну.

Эта же антенна используется и при приеме сигналов. Принятый сигнал усиливается и поступает на демодулятор — устройство, в котором происходит восстановление несущей частоты. Однополосный сигнал вновь преобразуется в обычный амплитудно-модулированный. Для восстановления сигнала может быть использован любой гетеродин, вырабатывающий нужную частоту, и смеситель. Восстановленный сигнал усиливается (в рассматриваемой схеме для этого используется предоконечный усилитель передающего тракта) и подается на телефоны или на динамик.

Наряду с подобными и более сложными станциями связи, устанавливаемыми обычно на кораблях, подводных лодках и глубоководных устройствах, все более широкое распространение получает простая и малогабаритная аппаратура для пловцов и водолазов. Она может успешно применяться при обеспечении различных водолазных работ, во время спортивных соревнований по подводному плаванию, при подводной охоте и в других аналогичных случаях. На рис. 56 показан комплект одного из образцов подобной аппаратуры, изготовленной во Франции. В него входит приемо-передающая станция *ERUS*-2А. Корабельная аппаратура выполняется в виде одного переносного блока с радиоэлектронными элементами, микрофоном, громкоговорителем, телефонами и устройством для зарядки аккумуляторов. Акустическая антенна *(б)* опускается за борт непосредственно на соединительном кабеле. Аппаратура водолаза размещена в герметическом цилиндрическом корпусе диаметром 80 *мм*, длиной 340 *мм* и весом в воздухе около 3 *кг*. Она крепится к бедру водолаза (*а*) и не стесняет его движений. Микрофон и телефоны размещаются в маске и соединяются с основной аппаратурой проводом.

Как бортовая аппаратура, так и аппаратура водолаза питаются от кадмиево-никелевых аккумуляторов напряжением 9,6 *в*. Радиус действия аппаратуры до 400 *м* по горизонту. Возможна работа на глубине до 60 *м*. В случае, если в воде одновременно находятся сразу несколько пловцов, все они могут переговариваться друг с другом и держать связь с бортовой станцией ЗПС.



Рис. 56. Аппаратура звукоподводной связи для водолазов

Разновидностью аппаратуры ЗПС с небольшой дальностью действия является аппаратура, излучающая в воду непосредственно человеческую речь. Сигналы при этом могут восприниматься ухом человека без применения какой-либо специальной техники. Таким образом оказывается возможным передавать информацию ныряльщикам на пляжах, подводным охотникам и спортсменам, не имеющим аппаратуры связи. На рис. 57 показано зарубежное устройство для голосовой связи под водой «Як-Як». Оно состоит из блока с радиоэлектронными элементами, излучателем и источниками питания, который помещается на поясе пловца, и ларингофона, закрепляемого на шее с помощью специального ремня.

Аппаратура собрана на транзисторах и питается от стандартных сухих батарей. Вес ее в воде 680 *г*. Излучаемая акустическая мощность 0,5 *вт* обеспечивает неискаженную передачу речевого сигнала в радиусе до 30 *м*, а тонального сигнала тревоги — до 100 *м*. Сигнал тревоги может включаться автоматически или вручную. Питание на схему подается только на время передачи речи или сигналов, что обеспечивает экономичное использование батарей. Имеется и вариант аппаратуры для передачи сигналов под

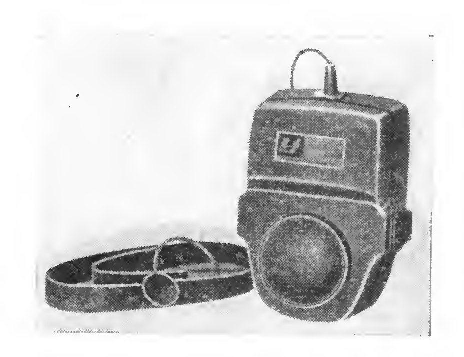


Рис. 57. Подводное громкоговорящее переговорное устройство «Як-Як»

воду с поверхности. Передающий блок в этом случае плавает с излучателем, обращенным в воду. Передаваемые аппаратурой «Як-Як» сигналы принимаются прямо на слух всеми пловцами, находящимися в радиусе ее действия.

При разработке и изготовлении портативной аппаратуры ЗПС для подводных пловцов необходимо учитывать не только общие особенности подводной связи, о которых уже было сказано ранее, но и некоторые специфические особенности. Рассмотрим важнейшие из них, представляющие практический интерес для любителей.

Следует помнить, что на разборчивости речи аквалангиста в сильной степени сказывается то, что он зубами и губами держит загубник шланга подачи воздуха. Замена загубника специальной резиновой маской для рта не улучшает разборчивость речи, так

как давление в маске, повышающееся за счёт преодоления сопротивления воды при разговоре, поднимает мягкое нёбо, закрывая проход между полостями рта и носа. Таким образом, разборчивость речи пловца всегда оказывается ниже, чем при разговоре в воздухе.

Микрофон должен быть водонепроницаемым, не реагировать на изменения внешнего гидростатического давления и обладать достаточно прочным корпусом, способным противостоять этому давлению. Достаточно хорошие результаты показал угольный микрофон. Он может быть закреплен в маске рта и обязательно должен быть загерметизирован. Для повышения эффективности микрофона его задняя (внешняя) стенка экранируется пористой резиной, препятствующей излучению в воду колеблющимся корпусом. Применение ларингофона нежелательно, так как он не воспроизводит шипящие, зубные и губные звуки и ухудшает и без того пониженную разборчивость речи.

Для прослушивания сигналов надо применять головные телефоны с костной проводимостью звука (остеофоны). С акустической точки зрения обычные головные телефоны (наушники), на первый взгляд, кажутся более пригодными. Воздух, находящийся между герметически прилегающими к голове наушниками и барабанной перепонкой, хорошо проводит звук. Однако при погружении аквалангиста повышается давление в полости рта, воздух через евстахиеву трубу поступает в среднее ухо, вызывая увеличение давления в нем, что может привести к разрыву барабанной перепонки. Это обстоятельство следует помнить и учитывать при экспериментах с подводной аппаратурой. При приеме речевых сигналов невооруженным ухом нельзя забывать о разнице акустических сопротивлений воздуха, к которому приспособились наши уши, и воды. Из-за этой разницы эффективность уха, как приемника звука, в воде оказывается в 3600 раз меньшей, чем в воздухе.

В качестве акустических антенн в принципе могут использоваться любые электроакустические преобразователи: пьезоэлектрические, пьезокерамические, магнитострикционные, электродинамические или

электромагнитные. Однако пьезоэлектрические и керамические, а также магнитострикционные преобразователи оказываются малопригодными в качестве излучателей для малогабаритных устройств, работающих на звуковых частотах, из-за небольших амплитуд смещения. Экспериментально было установлено, что в аппаратуре ЗПС для водолазов весьма эффективным оказывается излучатель с переменным магнитным сопротивлением, действующий по принципу наушника. Он обладает высоким импедансом и имеет большие амплитуды смещения на звуковых частотах. Излучатель должен быть водонепроницаемым, а при наличии диафрагмы исключать вредное влияние изменения внешнего гидростатического давления. Для устранения этого влияния может использоваться воздушный компенсатор — тонкая металлическая трубка, один конец которой соединен с полостью излучателя, а к другому прикреплена толстая резиновая труба, наглухо закрытая с одного конца. Так как объем резиновой трубы много больше пространства за диафрагмой, при погружении аквалангиста и деформации резиновой трубы гидростатическим давлением сжимающийся в трубе воздух, попадая в полость излучателя, выравнивает давление с обеих сторон диафрагмы.

Приемно-усилительный тракт аппаратуры связи при работе на ультразвуковых частотах может быть построен по принципу прямого усиления сигналов с детектированием модулирующих колебаний звуковой частоты. При приеме сигналов на слышимых звуковых частотах усиление оказывается нецелесообразным, так как на этих частотах весьма значителен уровень шумов моря и эти шумы будут усиливаться в первую очередь, поэтому прием сигналов производится прямо из воды невооруженным ухом.

В усилителях и генераторах подобной аппаратуры целесообразно применять транзисторы из-за их компактности, экономичности, удобства герметизации и возможности устранения воздействия гидростатического давления за счет заливки всей схемы эпоксидной смолой. В малогабаритной аппаратуре ЗПС могут использоваться любые источники питания, как аккумуляторы, так и сухие батареи. Для экономии

энергии необходимо предусмотреть выключатель, позволяющий подавать питание только во время работы на излучение. В малогабаритных устройствах возможен также специальный режим работы для вызова другого аквалангиста или подачи сигнала тревоги. При этом излучаются прерывистые сигналы максимальной мощности на частоте порядка 800 *гц*. После установления связи аппаратура может быть переведена в обычный режим передачи телефонных сигналов. Можно предполагать, что аппаратура ЗПС, как промышленного, так и любительского изготовления, найдет широкое применение среди спортсменов, подводных охотников, ученых, изучающих подводный мир, и представителей других специальностей.

28. Подводная телеметрия

Разнообразная информация, получаемая в ходе подводных исследований, должна передаваться на корабли, береговые посты и другим потребителям, часто удаленным на значительное расстояние от источников. Передача информации из-под воды по проводам оказывается дорогой и неудобной, особенно при связи с глубоководными или движущимися объектами, а по радиоканалам просто невозможной из-за огромного затухания электромагнитных волн в воде. И здесь на помощь приходит гидроакустика. За последнее время акустическая телеметрия, т. е. передача на расстояние данных о каких-либо контролируемых параметрах в виде гидроакустических сигналов, приобретает все большее значение.

Подводные телеметрические системы, основанные на гидроакустических принципах, находят широкое применение как в военно-морском флоте при испытаниях подводного оружия, так и при решении разнообразных народнохозяйственных и исследовательских задач. Например, телеметрические системы применяются в рыболовном флоте для передачи информации с сетевого зонда на корабль о работе трала, о величине раскрытия его устья, о количестве рыбы, вошедшей в трал, и о глубине его хода. С помощью телеметрических систем удается наблюдать за

поведением рыб и морских животных, «меченных» акустическими передатчиками. В океанографии телеметрические системы позволяют получать информацию о температуре и солености воды, о скорости течения и о других интересующих ученых параметрах от разнообразных датчиков, устанавливаемых на различной, часто очень большой, глубине. Телеметрические системы используются и при добыче полезных ископаемых и нефти на подводных промыслах. Телеметрия позволяет следить за состоянием оборудования, управлять на расстоянии различными механизмами, находящимися на дне моря, и решать многие и многие другие задачи.

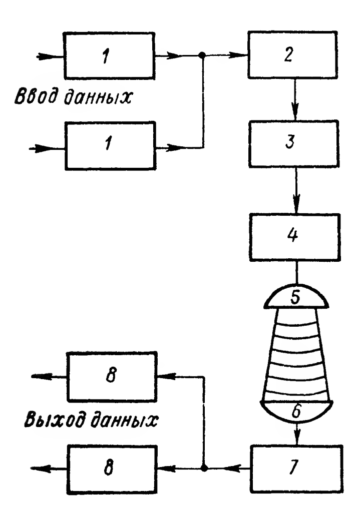


Рис. 58. Блок-схема гидроакустической телеметрической системы

1, 2, — генераторы поднесущих (*1*) и несущих (*2*) частот; *3* — усилитель; *4* — усилитель мощности; *5, 6* — акустические антенны, передающая (*5*) и приемная (*6*); *7, 8* — дискриминаторы несущей (*7*) и поднесущих (*8*) частот

Рассмотрим кратко принцип действия одного из возможных вариантов гидроакустической телеметрической системы (рис. 58). Электрические сигналы, поступающие от датчиков—источников информации, модулируют по частоте поднесущие, вырабатываемые специальными генераторами. Обычно в качестве поднесущих берут стандартные частоты, используемые и в телеметрических системах, основанных на других принципах передачи энергии. Это позволяет применять в аппаратуре стандартные элементы формирования сигнала. Модулированные по частоте поднесущие поступают на генератор несущей частоты, где происходит их вторичная модуляция. Несущая частота выбирается с учетом специфики распространения акустических колебаний в воде. Так, в рассматриваемой системе она принята равной 40 *кгц*. В результате

двукратной модуляции образуется ЧМ/ЧМ сигнал, который и подается на излучающую акустическую антенну. Датчики измеряемых величин и вся аппаратура передающего тракта обычно устанавливаются на дне моря, на глубоководном устройстве или подвешиваются в воде на кабеле на заданной глубине.

Аппаратура, предназначенная для приема информации, размещается на поверхности воды — на корабле, буе, береговом посту и т. п. Сигналы, поступающие на приемную антенну, после усиления подаются на дискриминатор несущей, в котором происходит демодуляция несущей частоты, и на его выходе выделяется совокупность модулированных поднесущих частот. Эти частоты демодулируются в дискриминаторах поднесущих, на выходах которых происходит выделение первоначальной информации в том виде, в каком она поступила на вход передающего тракта телеметрической системы. Выходной сигнал, воспроизводящий первоначальную информацию, регистрируется с помощью осциллографов, самописцев или каких-либо иных устройств.

Некоторые акустические телеметрические системы могут одновременно передавать информацию в цифровом виде от десяти различных датчиков и один телефонный разговор. В необходимых случаях системы могут сочетаться с радиоканалом: информация, поступающая из-под воды по акустическому каналу, на поверхности преобразуется и передается дальше с помощью радиопередатчика, что позволяет значительно увеличить дальность передачи данных.

29. Морская биоакустика

С развитием гидроакустики было развеяно одно из наиболее старых и стойких заблуждений — представление о море как о мире безмолвия. Правда, отдельные упоминания о «разговорах рыб» и о других звуках, создаваемых рыбами и морскими животными, встречались уже в древние времена. Настоящее их изучение стало возможным лишь в последние десятилетия, после появления соответствующей гидроакустической аппаратуры. Родилась даже специальная отрасль акустики — биогидроакустика, занимаю-

щаяся изучением звуков, создаваемых морскими животными, и помех работе гидроакустической аппаратуры, возникающих по этой причине. Почетное место в ее развитии принадлежит советским ученым. В 1968 г. группа отечественных ученых создала уникальный атлас «Звуки рыб», и теперь каждый желающий может прослушать эти звуки, воспользовавшись приложенной к атласу граммофонной пластинкой.

Изучение звуков, создаваемых морскими животными и рыбами, имеет большой научный и практический интерес. Человек успешно использует свои знания при разведке мест скопления рыб и животных, например, при разведке камчатского краба, а также для классификации, т. е. определения вида животных. Высказывается предположение, что изучением в воду записанных ранее призывных звуков, издаваемых в брачную пору или при питании, можно привлекать к месту лова таких рыб, как горбылевые и сельдевые и другие промысловые виды. Исследования японских специалистов показали, что рыбы реагируют на подводные сигналы с расстояния до 1000 *км*. Предполагают также, что возможно удастся изгонять из определенных районов некоторые виды морских животных, например, акул, создавая неприятные для них звуки или звуки, излучаемые их врагами. Таким же способом, возможно удастся загонять рыбу в тралы и другие орудия лова.

Большое значение приобрели биологические исследования, связанные с изучением наиболее загадочных животных морей и океанов — дельфинов. Уже получены первые интересные результаты. Ученые установили, что в жизнедеятельности и взаимном общении дельфинов большое значение принадлежит различным гидроакустическим сигналам. Оказалось, что дельфин имеет два, а по некоторым наблюдениям даже три источника звука, позволяющие создавать колебания с частотой от 150 *гц* до 120 и более *кгц*, имеющие различную форму (от прямоугольных импульсов до правильной синусоиды).

Звуки, создаваемые дельфинами, меняются по частоте и амплитуде в широком диапазоне и похожи, по мнению различных наблюдателей, обладающих,

как видно, незаурядной фантазией, на свист, щелканье, писк, скрип, жужжание, щебетание, журчание, брюзжание, визг, чириканье и даже мычание и мяуканье. С научной точки зрения, интерес представляют менее живописные, но более точные описания результатов исследования сигналов дельфинов, полученные в результате анализа частотного состава звуков и распределения частотных составляющих спектра во времени и по амплитуде с помощью специальной радиоэлектронной аппаратуры.

Исключительно важную роль в жизни дельфинов играет звуколокация. Как выяснилось, «звуколокатор» дельфина значительно превосходит по своим возможностям даже самые совершенные гидролокаторы, созданные руками человека. «Звуколокатор» дельфина позволяет излучать и принимать акустические колебания, лежащие в широком диапазоне частот, изменять частоту этих сигналов, менять направленность излучения от всенаправленного до узкого луча, так сочетать работу своих нескольких источников звука, чтобы получить колебания сложной формы, модулированные по амплитуде и по частоте. С помощью своего «звуколокатора» дельфин может свободно ориентироваться в сложной окружающей обстановке. Так, в ходе экспериментов была обнаружена способность дельфинов почти безошибочно различать небольшие предметы по их размерам. Дельфин Элис легко распознавал больший из двух металлических шариков, один из которых имел диаметр 5 *см*, а другой 6,2 *см*. Даже при разнице диаметров всего лишь в 8 *мм* дельфин почти не ошибался, выбирая бо́льший. Такую точность гидролокации можно считать на сегодняшний день исключительной и значительно превосходящей достигнутую современными существующими техническими средствами. В некоторых случаях звуколокатор дельфинов позволял распознавать предметы и по материалу, из которого они были изготовлены. Исследование звуколокации дельфинов не могло бы быть осуществлено без применения разнообразной гидроакустической и другой радиоэлектронной аппаратуры.

Но, пожалуй, совершенно исключительную роль играет радиоэлектроника при изучении «языка»

дельфинов и попытках установления связи человека с дельфином как с разумными существами. Помимо непосредственного научного и практического значения решения этой проблемы, по смелым предположениям многих ученых, некоторые аспекты ее решения смогут послужить основой в будущем при установлении связи с представителями далеких внеземных цивилизаций. Оговоримся заранее, что мы не рассматриваем здесь различные и довольно сложные философские и другие проблемы, относящиеся к оценке существования мыслительных способностей у дельфинов, существования у них языка, речи и т. п. и ограничимся только рассмотрением радиоэлектронного обеспечения исследований.

Итак, первые попытки установления связи с дельфинами дали обнадеживающие результаты. Связь осуществлялась с помощью специально разработанной радиоэлектронной аппаратуры. При этом использовали два принципиально различных подхода к решению задачи.

Одним из путей явилось создание аппаратуры, позволяющей преобразовывать человеческую речь в звуки более высоких частот, лежащие в области наилучшей слышимости дельфина, а высокочастотные звуки, издаваемые дельфином, в более низкие частоты, воспринимаемые человеком. При наличии такой аппаратуры ученый мог обращаться к дельфину, который слышал его слова преобразованными в удобную для него по частоте форму и повторял их в том виде, в каком он их слышал. После обратного преобразования «ответ» дельфина звучал на частотах человеческой речи, и экспериментатор имел возможность сопоставить «вопрос» и «ответ», определить, как правильно воспринимает и воспроизводит дельфин человеческую речь. Этим же путем можно было передавать дельфину отдельные команды, прослушивать звуки, издаваемые им самостоятельно, без предшествующего обращения к нему и т. п.

Блок-схема аппаратуры, построенной по этому принципу, приведена на рис. 59. Преобразование человеческой речи осуществлялось с помощью десятиканального вокодера — устройства, позволяющего осуществлять сжатие спектра речи. С помощью

полосовых фильтров спектр человеческой речи распределялся по 10-ти каналам, на выходах которых из усиленных сигналов выделялись основные тона. Выпрямленные сигналы основных тонов модулировали более высокие частоты и пропускались через полосовые фильтры, центральные частоты которых были

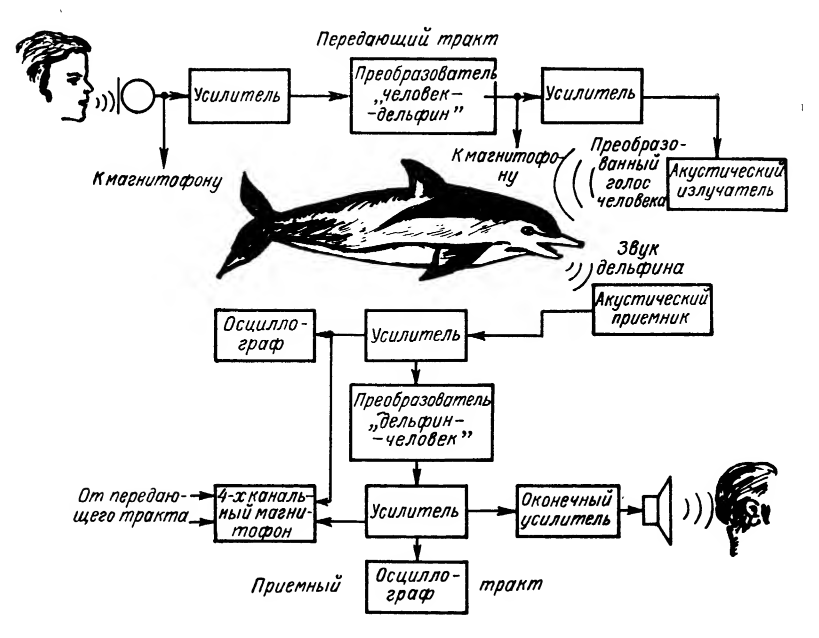


Рис. 59. Электронное преобразование спектра частот человеческой речи в область более высоких частот и звуков дельфина в область более низких частот

в 10 раз выше частот соответствующих основных тонов. Таким образом происходил сдвиг спектра частот человеческой речи на один порядок вверх. Полученный при этом высокочастотный сигнал после усиления подавался на акустическую антенну и излучался в бассейн, где находился дельфин. Ответные сигналы дельфина, принятые антенной, подвергались преобразованию в обратном порядке. С помощью осциллографов можно было наблюдать форму сигналов дельфина до и после их преобразования, а

4-х канальный магнитофон позволял регистрировать весь «диалог» для его последующего анализа.

В другом эксперименте использовались свисты, более привычные для дельфинов, чем преобразованная человеческая речь. Радиоэлектронная аппаратура, разработанная для этой цели (рис. 60), переводила человеческую речь в определенную последовательность свистов на частоте, удобной для восприятия дельфинами. В свою очередь, ответные свисты, создаваемые дельфинами, преобразовывались в искус-

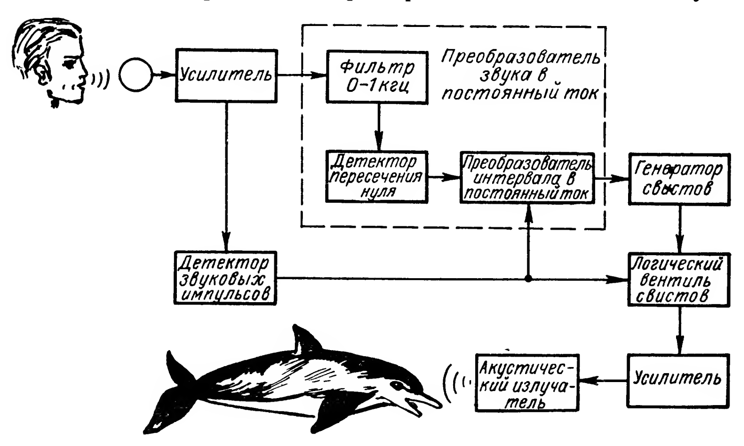


Рис. 60. Электронное преобразование искусственных слов в свисты с различной высотой тона

ственные слова. Для сигнализации было разработано нечто вроде азбуки этого искусственного квазидельфиньего языка: некоторым фонетическим звукам человеческой речи были приписаны определенные частоты свиста, например, звуку «*A*» соответствовала частота 7 *кгц*, звуку «*I*» — 11 *кгц*, звуку «*R*» — 11,5 *кгц* и т. д. Для перевода звуков в свист использовалась особенность работы речевого аппарата человека. Как известно, колебания голосовых связок вызывают появление серии акустических импульсов, которые многократно отражаются во рту и в горловых полостях человека, и в них вводится определенная последовательность временных задержек, зависящая от положения языка, губ и т. п. Эта последо-

вательность и определяет ту информацию, которая содержится в речи. С помощью аппаратуры определялась величина временной задержки между моментом щелканья голосовых связок (началом импульса) и моментом излучения одной из частот в выходном сигнале речи, лежащей примерно в диапазоне 500—800 *гц*. Временная задержка преобразовывалась в напряжение постоянного тока с амплитудой, пропорциональной измеренной величине задержки. Это напряжение подавалось на вход генератора свистов и управляло вырабатываемой им частотой. Каждой величине задержки соответствовала своя частота генератора. Логически вентиль свистов обеспечивал их генерирование лишь в течение определенного промежутка времени, при условии наличия на входе аппаратуры сигналов человеческой речи. Усиленные свисты с помощью акустической антенны излучались в воду.

Для передачи различных сигналов и команд использовались искусственные слова, состоящие из нескольких звуков, составляющих азбуку свистов. Так, например, слово *ВАЕР* означало команду «начать звуколокацию», *ВЕТАР* — проплыть через обруч и т. д. Ответные сигналы — свисты — преобразовывались аппаратурой в обратном порядке и вызывали образование звуков синтезируемого языка. Ограниченность числа используемых звуков и слов определялась трудностью восприятия человеком сложных ответных сигналов дельфина.

В ходе эксперимента удалось не только научить дельфина точно повторять сказанные ему слова — свисты (правильность повторения тренер подтверждал словом *BIYP* и давал дельфину рыбу), но и выполнять некоторые простейшие команды. Так, например, дельфин по имени Дэш научился по словесной команде различать мяч и обруч, плавающие в бассейне, проплывал через обруч, отплывал на противоположную сторону бассейна и ждал дальнейших «указаний».

Конечно, все это еще очень далеко от того, чтобы можно было говорить о речевой связи. Проведенные эксперименты лишь показывают, что дельфин способен повторять определенные звуки и выполнять

некоторые команды. Это способны делать и многие другие животные. Остается непреодолимый на сегодняшний день межвидовой барьер. Необходимо решить многие технические проблемы. Но человек надеется с «помощью» дельфина раскрыть еще многие тайны морских глубин. И исключительная роль в этом радиоэлектроники не вызывает сомнения.

30. Подводное звуковидение

Известно, что из всех органов чувств человека зрение обеспечивает получение наибольшей информации об окружающем мире. Широко известна поговорка «лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать». Эта поговорка справедлива и для наблюдения под водой. Однако мы уже знаем, что свет в воде распространяется лишь на очень небольшие расстояния и видимость под водой редко превышает единицы метров. В мутной заиленной воде и на большой глубине видимость практически отсутствует. Применение различных источников подводного освещения оказывается полезным лишь в некоторых случаях. И в то же время встречаются самые разнообразные случаи, в которых необходимо видеть какой-либо подводный объект. Под словом «видеть» мы понимаем прежде всего возможность определить форму предмета и его размеры, т. е. получение лишь части информации, поступающей через глаза. Но и такая ограниченная возможность представляет огромный практический интерес. В самом деле, как определить, от чего получен эхосигнал при гидролокации — от камня, мины, лежащей на дне, или от затонувшей бочки? Как найти среди многих предметов, создающих примерно одинаковый эхосигнал, именно тот, который нас интересует? Оказывается и эта задача может быть решена с применением принципов гидроакустики. Правда, на сегодняшний день решение этой задачи еще не вышло за рамки эксперимента, но, как можно судить по сообщениям печати, эксперимент развивается успешно.

Известный советский ученый Л. Д. Розенберг назвал способы получения изображения с помощью ультразвука звуковидением. Рассмотрим кратко сущ-

ность этого явления. Общий принцип звуковидения схож с видением в световых лучах. Только наблюдаемый объект облучается не светом, а ультразвуком и отраженные от него лучи, образующие звуковое изображение предмета, преобразуются в видимое глазом изображение. При этом возникают две основные технические проблемы: получение звукового изображения и преобразование его в видимое.

Трудность построения звукового изображения состоит в получении необходимой разрешающей способности. Так как звуковые волны значительно длиннее световых, для получения высокой разрешающей способности приходится использовать очень высокие частоты, достигающие десятков мегагерц. Однако и в этом случае разрешающая способность оказывается недостаточно высокой. Так, например при использовании ультразвука с частотой 4 *Мгц*, как это имеет место в реальной аппаратуре, длина волны в воде составляет 0,37 *мм,* т. е. в 740 раз больше длины волны видимого света. Соответственно ухудшается и разрешающая способность. Звуковое изображение мельчайшей детали наблюдаемого предмета должно иметь размеры не менее 1,175 *мм.* При менение более высоких частот нежелательно по двум причинам: затруднено генерирование таких частот для акустической «подсветки»; с увеличением частоты резко возрастает затухание ультразвука в воде. Однако и при очень больших затуханиях, имеющих место на мегагерцевых частотах, дальность звуковидения значительно превосходит дальность видимости в световых лучах.

Трудность получения звукового изображения малых предметов связана и еще с одним явлением. Если элементы отражающей поверхности много меньше длины падающей волны, происходит зеркальное отражение с соблюдением закона «угол отражения равен углу падения». В этом случае изображение попадет в объектив лишь при определенном его расположении относительно наблюдаемого предмета, а в общем случае предмет может оказаться невидимым. Если же элементы отражающей поверхности соизмеримы или больше длины падающей волны, энергия отражается диффузно, распространяясь во все

стороны. Очевидно, что и с этой точки зрения желательно уменьшить длину волны подсвечивающих колебаний, в противном случае мелкие предметы или детали поверхности наблюдаемого объекта просматриваться не будут. Итак,, при «освещении» какого-либо подводного объекта ультразвуком можно получить его звуковое избражение, которое представит собой распределение звукового давления в фокальной плоскости «звукового объектива», вызванное диффуз-

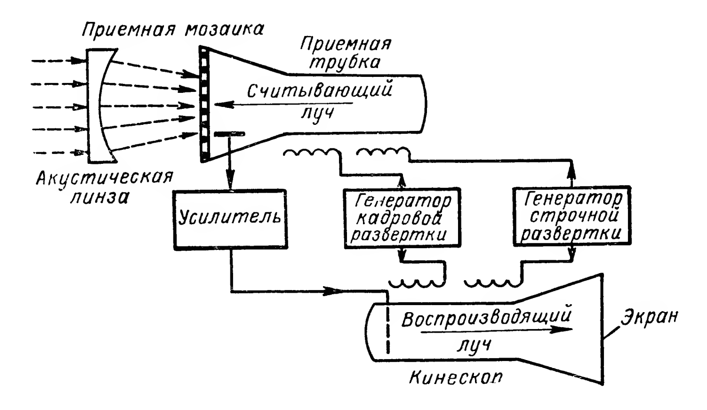


Рис. 61. Упрощенная схема звуковизора

ным отражением акустической энергии от отдельных элементов поверхности рассматриваемого предмета. Степень соответствия изображения самому предмету будет зависеть от уже рассмотренных выше причин.

Возникает необходимость принять это изображение и преобразовать его в видимое. Это может быть осуществлено различными методами, но в подводном звуковидении наиболее приемлем метод приема сигналов с использованием уже рассмотренных ранее принципов акустико-электрического преобразования. Обычно для преобразования акустического сигнала в электрический используют пьезоэлектрический эффект. Все устройство, обеспечивающее преобразование акустического изображения в видимое, называют электронно-акустическим преобразователем (ЭАП). Схема такого устройства (рис. 61) была

предложена еще в 1936 г. известным советским акустиком С. Я. Соколовым.

С помощью акустической линзы изображение фокусируется на принимающую поверхность специальной электроннолучевой трубки, изготовленную из пьезокерамики. При попадании на эту поверхность звукового изображения на ней создаются статические заряды, распределение которых воспроизводит распределение звуковых давлений в изображении. Если снимать величину этого заряда с помощью электронного луча, совершающего растровую развертку, как в телевизоре, на выходе трубки образуется видеосигнал. Несмотря на кажущуюся простоту идеи, создание трубки было сопряжено со значительными техническими трудностями, которые были успешно преодолены советскими учеными. Основная из них состоит в том, что пьезоэлектрическая приемная поверхность очень небольшой толщины является частью электровакуумного прибора. Чтобы обеспечить ей необходимую прочность и сохранить вакуум, в пьезоматериал впаяны металлические электроды, число которых достигает десятка, а иногда и нескольких сотен на квадратный сантиметр. Эти электроды проходят через стекло передней стенки трубки. Видеосигнал, снимаемый с приемной трубки, усиливается и подается на воспроизводящую электроннолучевую трубку.

Существуют и другие идеи приема изображения. Так, в одном из таких устройств вывод каждого отдельного элемента принимающей поверхности подключается к усилителю через фотодиод. Фотодиоды по очереди отпираются для опроса соответствующего элемента путем облучения их узким лучом света. При такой конструкции приемного устройства не требуется создания вакуума. За счет этого могут быть уменьшены габариты аппаратуры. Как сообщалось в печати, уже существуют экспериментальные установки подводных звуковизоров, позволяющие наблюдать небольшие предметы в мутной воде на расстоянии порядка 10 *м*.

Высказывается предположение, что в недалеком будущем звуковизоры будут устанавливаться на глубоководных аппаратах и даже использоваться водолазами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы познакомились с одной из областей современной прикладной радиоэлектроники — гидроакустикой. Все развитие этой техники неразрывно связано с освоением человечеством Мирового океана. И именно сейчас, когда человечество ставит задачу полностью освоить глубины морей, поставить на службу себе все скрытые океаном сокровища, в развитии гидроакустики достигнуты исключительные успехи. Возможности гидроакустики реализованы еще далеко не полностью, и можно ожидать, что в самом недалеком будущем мы узнаем о многих и многих новых областях ее применения. И сегодня использование гидроакустики далеко не исчерпывается рассмотренными нами примерами.

Исключительно велика роль гидроакустики в военном деле. Подводное обнаружение противника и выход подводной лодки в атаку с любой глубины; обнаружение и преследование подводных лодок кораблями; системы самонаведения торпед, акустические неконтактные взрыватели, оборудование полигонов для исследования подводного оружия — вот далеко не полный перечень важнейших направлений применения гидроакустики в военном флоте.

Гидроакустика все более широко применяется для обеспечения кораблевождения, позволяя кораблям и подводным лодкам плавать в самых сложных и необычных условиях. На дне океанов появились акустические маяки, в том числе и использующие ядерные источники энергии. Эхоледомеры и эхоайсбергомеры открыли подводным лодкам путь подо льдами Арктики и Антарктики. Доплеровские гидроакустические навигационные системы позволяют вести непрерывное счисление места корабля с высокой точностью. Небывалый размах приобрело картографирование морского дна.

Разнообразная гидроакустическая техника давно уже стала незаменимым помощником рыбаков и ученых, изучающих жизнь моря. Все шире используется она геологами. Сейсмоакустические исследования структуры дна, разведка полезных ископаемых и нефти, обеспечение работы глубоководных устройств

и подводных промыслов сегодня невозможны без этой техники. Специальные системы гидроакустических ориентиров и ответчиков обеспечивают удержание на месте с высокой точностью плавучих платформ для бурения сверхглубоких скважин в земной коре.

Гидроакустика все более широко применяется и для решения таких экзотических задач, как поиски затонувших сокровищ, в подводной археологии и даже в установлении факта существования легендарного подводного чудовища в шотландском озере Лох-Несс. или раскрытия тайны града Китежа. Как мы уже видели, гидроакустическая техника становится достоянием спортсменов и любителей водного спорта.

Среди проблем, стоящих перед человечеством, решение которых ожидается в самом недалеком будущем, есть и такие, как обеспечение возможности длительного нахождения человека под водой, создание опытных подводных обитаемых станций и последующая колонизация континентального шельфа и дна океана и многие другие. И среди специальной техники, предназначенной для решения этих грандиозных задач, несомненно, достойное место займет разнообразная гидроакустическая аппаратура.

ЛИТЕРАТУРА

Научно-популярная

Карлов Л. Б. и Шошков Е. Н. Гидроакустика в военном деле. М., Воениздат, 1963.

Клюкин И. И. Нептун оглушен... Л., «Судостроение», 1967.

Простаков А. Л. Гидроакустика в военно-морском флоте. М., Воениздат, 1961.

Специальная

Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря. Л., Гидрометеоиздат, 1967.

Сташкевич А. П. Акустика моря. Л., «Судостроение», 1966.

Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. Л., «Судостроение», 1966.

Простаков А. Л. Гидроакустика и корабль. Л., «Судостроение», 1967.

Хортон Д. Основы гидролокации. Л., Судпромгиз, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ан. Сергеев

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ПОД ВОДОЙ

Редакторы **А. И. Важинская, И. М. Андреева.**
Художественный редактор **Г. А. Гудков**
Технический редактор **О. С. Житникова**
Корректор **С. А. Иовенко**

Сдано в производство 27/VIII 1970 г. Подписано к печати 8/I 1971 г. М-22006. Печ. л. прив. 7,56. Уч.-изд. л. 6,8. Бум. л. 6,8. Бум. л. 2,25. Бумага типографская № 2, формат 84×108¹/₃₂. Тираж 25 000 экз. Цена 35 коп. Заказ № 1925.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Социалистическая, 14.

35 коп.

